



# Technische Universität Braunschweig

Institut für Baustoffe,  
Massivbau und Brandschutz

Institut für Grundbau  
und Bodenmechanik

## **Innenkorrosion von zementgebundenen Rohren für die Schmutzwasserkanalisation**

### **Literaturstudie und Schadensanalyse im Rahmen des Kooperationsvorhabens**

### **"Entwicklung und Pilotbetrieb eines multifunktionalen Roboter-Molchs für die Sanierung undichter Abwasserleitungen"**

**1992**

**Untersuchung im Auftrag der  
KTN GmbH & Co. KG, Wendhausen**

Innenkorrosion von zementgebundenen Röhren  
für die Schmutzwasserkanalisation

Literaturstudie und Schadensanalyse  
im Rahmen des Kooperationsvorhabens

"Entwicklung und Pilotbetrieb eines multifunktionalen Robotor-Molchs für die  
Sanierung undichter Abwasserleitungen"

Beteiligte Wissenschaftler: Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy  
Dipl.-Ing. K.- Ch. Thienel  
Dipl.-Ing. T. Trampenau  
Institut für Baustoffe, Massivbau und  
Brandschutz, IBMB,  
Technische Universität Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz  
Dipl.-Ing. T. Voigt  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, IGB,  
Technische Universität Braunschweig

1	Einleitung	1
2	Schwefelverbindungen im Abwasser	3
2.1	Einleitung	3
2.2	Herkunft, Arten und Eigenschaften von Schwefelverbindungen	3
2.3	Der Schwefelkreislauf	8
2.4	Zusammenfassung	10
3	Die Biogene-Schwefelsäure-Korrosion in Abwasserkanälen	12
3.1	Einleitung	12
3.2	Bedingungen für die Biogene-Schwefelsäure-Korrosion (BSK)	12
3.3	Einflüsse bei der Entstehung und Umsetzung von Sulfid	14
3.3.1	Der Sauerstoffhaushalt	14
3.3.2	Die Sielhaut	16
3.3.3	Die Sohlablagerungen	21
3.3.4	Die Kanalatmosphäre in Freispiegelleitungen	22
3.3.5	Die Kondensation in Freispiegelleitungen	25
3.3.6	Die Druckrohrleitungen	25
3.3.7	Die Karbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen	26
3.4	Schwefelsäurebildung durch Thiobacillen	27
3.5	Die Korrosion und typische Schadensbilder zementgebundener Baustoffe	32
3.5.1	Asbestzement als Bindemittel für Abwasserkanalrohre	37
3.6	Zusammenfassung	38
4.	Schadensanalyse	40
4.1	Einleitung	40
4.2	Ausbau und Bestandsaufnahme	41
4.3	Schadensbeschreibung	45
4.4	Bodenmechanische Untersuchungen	47
4.5	Untersuchungen am Asbestzementrohr	49
4.5.1	Chemische Analyse	49
4.5.2	Scheiteldruckprüfung und Ringbiegezugfestigkeit	49
4.5.3	Einfluß einer seitlichen Bettung	52

4.6	Ermittlung der Schadensursachen und Beurteilung der Resttragfähigkeit	55
4.7	Zusammenfassung	57
5	Maßnahmen und Verfahren zur Schadensvermeidung und Schadenssanierung	59
5.1	Einleitung	59
5.2	Korrosionsschutzmaßnahmen zementgebundener Rohrleitungen	59
5.3	Verfahren zur Schadensbehebung	66
5.3.1	Allgemeines	66
5.3.2	Instandsetzungsverfahren	69
5.3.3	Sanierungsverfahren	70
5.3.3.1	Allgemeines	70
5.3.3.2	Beschichtungsverfahren	70
5.3.4	Relining-Verfahren	72
5.3.4.1	Rohrstrang-Relining	73
5.3.4.2	Kurzrohr-Relining	75
5.3.4.3	Wickelrohr-Relining	76
5.3.4.4	Schlauch-Relining	77
5.3.5	Montageverfahren	78
5.3.6	Erneuerungsverfahren in geschlossener Bauweise	78
5.3.6.1	Berstverfahren	79
5.4	Zusammenfassung	81
6	Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Schadensbehebung	83
7	Zusammenfassung	87
8	Literaturverzeichnis	89
	Anhang	92

## 1 EINLEITUNG

Aufgrund des wachsenden öffentlichen Interesses an der Erhaltung der Umwelt wurde der Bau von Abwasseranlagen verstärkt vorangetrieben. Die bei den Bau-  
maßnahmen am häufigsten verwendeten Werkstoffe bestanden zum überwiegenden  
Teil aus zementgebundenen Materialien (Beton, Asbestzement), die gegenüber  
Steinzeug oder Natursteinen gewisse Vorteile bieten und meist kostengünstiger  
sind.

Seit den 60er Jahren sind in Deutschland in zunehmenden Maße Gruppenklärwerke  
errichtet worden, die im Vergleich zu mehreren kleineren Kläranlagen eine  
Reihe von Vorteilen aufweisen wie Belastungsausgleich, geringere spezifische  
Bau- und Betriebskosten, höherer Wirkungsgrad und bessere Überwachung. Aller-  
dings ist bei der Planung häufig nicht beachtet worden, daß im Abwasser auf  
dem längeren Fließweg von der Anfangsstelle bis zum Klärwerk Veränderungen  
der Abwasserinhaltsstoffe, insbesondere der Schwefelverbindungen, erfolgen  
können, die eine Reihe bislang in Deutschland nicht oder nur wenig bekannter  
Probleme bewirken.

Baustoffe in Abwasserbauwerken unterliegen langzeitigen, wechselnden und  
vielfältigen Beanspruchungen, die unter Umständen, häufig bei Zusammentreffen  
mehrerer Faktoren, die Baustoffzerstörung und in der Folge den Bauwerkszusam-  
menbruch verursachen können. Zur Einordnung der in dieser Arbeit behandelten  
Biogenen-Schwefelsäure-Korrosion (BSK) sind Möglichkeiten der Baustoffzerstö-  
rung in Abb. 1.1 dargestellt.

Etwa 50 Jahre lang bestand die Anschauung, daß die Schwefelsäure durch chemi-  
sche Oxidation von Schwefelwasserstoff gebildet wird, bis dann von Pomeroy  
(1946) in den USA und von Parker (1951) in Australien über die biogene Ent-  
stehung der Schwefelsäure berichtet wurde.

Spektakuläre Korrosionserscheinungen in Abwassersammlern führten zum Aufgrei-  
fen der Thematik in den 70er Jahren in Deutschland. Vor allem am Hamburger  
Sammlersystem wurden von 1979 bis 1984 umfassende Forschungen zu diesem The-  
menkomplex durchgeführt. Die Bedeutung der durch bakterielle Tätigkeiten ge-

bildeten unerwünschten flüchtigen Schwefelverbindungen, im weiteren Verlauf als Sulfidprobleme bezeichnet, ist in folgenden Wirkungen zu sehen:

- Korrosion (speziell bei zementgebundenen Materialien)
- Sicherheitsgefährdung von Betriebspersonal
- Geruchsemission
- verminderte Reinigungsleistung biologischer Abwasserreinigungsstufen

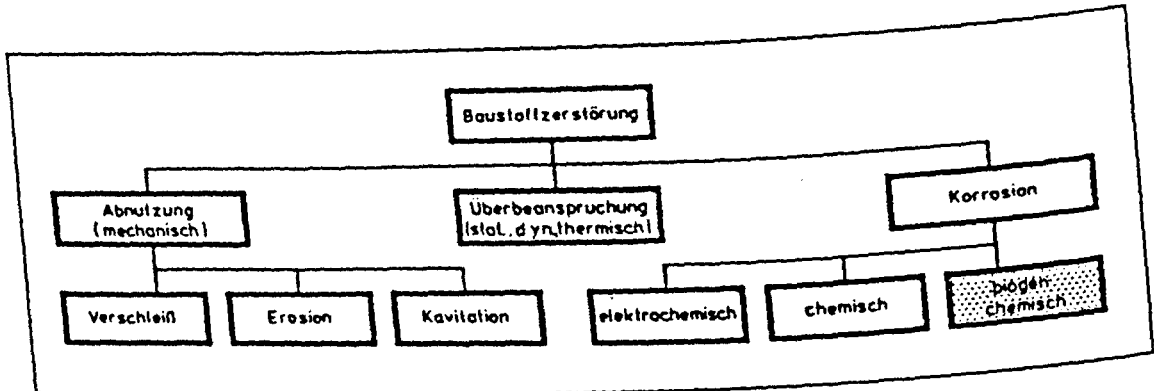


Abb. 1.1: Arten der Baustoffzerstörung /1/

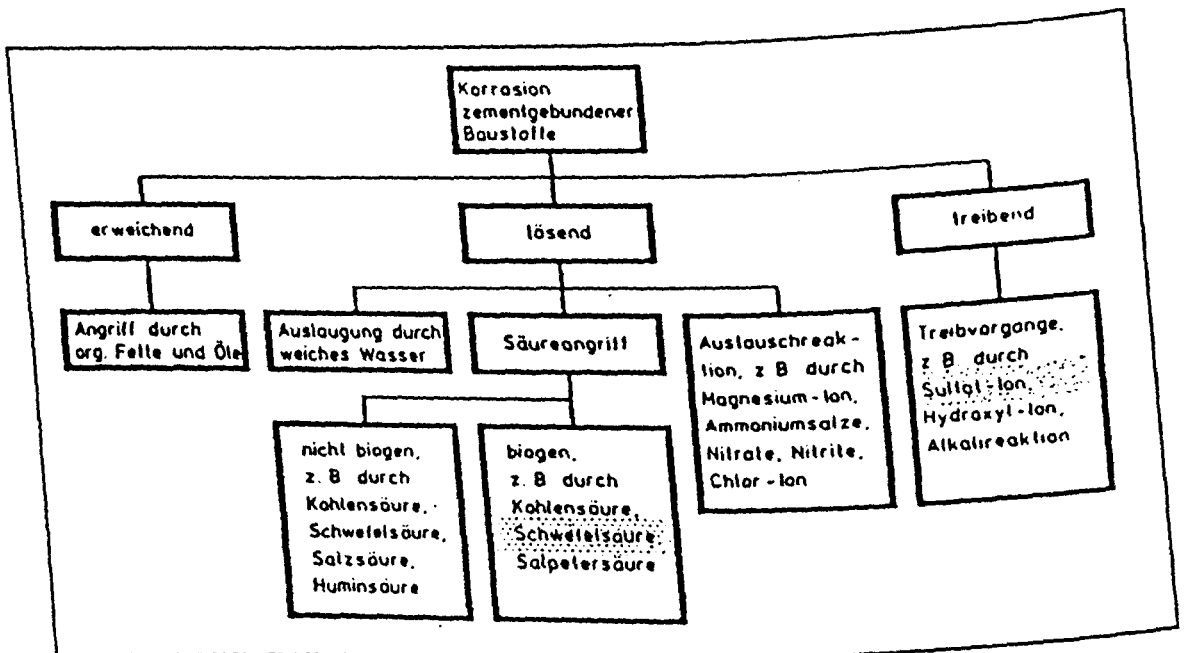


Abb. 1.2 Korrosionsarten zementgebundener Baustoffe /1/

In wärmeren Regionen unserer Erde (z.B. Australien, USA, Südafrika) ist diese Problematik seit mehreren Jahrzehnten bekannt. Erste Beobachtungen erfolgten um 1900, bei denen auch erkannt wurde, daß Korrosionserscheinungen durch Schwefelsäure verursacht werden können. Bei zementgebundenen Baustoffen sind neben der BSK eine Vielzahl weiterer Korrosionsarten möglich (Abb. 1.2), auf die aber im weiteren Verlauf nicht näher eingegangen wird.

## **2 SCHWEFELVERBINDUNGEN IM ABWASSER**

### **2.1 Einleitung**

Es wird zunächst ein kurzer Überblick über die Herkunft, die Arten und die Eigenschaften von Schwefelverbindungen gegeben. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Eigenschaften von Schwefelwasserstoff, da diese Verbindung eine entscheidende Rolle im Korrosionsprozess spielt. Desweiteren werden die zwei wichtigsten Bestandteile des Schwefelkreislaufs beschrieben, der Protein-Stoffwechsel und die Desulfurikation, um im weiteren Verlauf die komplexen Zusammenhänge der Biogenen-Schwefelsäure-Korrosion (BSK) an zementgebundenen Rohrwerkstoffen besser verstehen zu können.

### **2.2 Herkunft, Arten und Eigenschaften von Schwefelverbindungen**

Abwasser kann Schwefel in verschiedenen Oxidationsstufen mitführen. Schwefel in frischem, häuslichen Abwasser weist überwiegend positive Oxidationsstufen auf, während in anoxischem und anaerobem Abwasser vorwiegend reduzierte Schwefelverbindungen enthalten sind. Je nach Einleitungen und Betriebszuständen unterscheidet man bei Schwefelverbindungen zwischen anorganischem und organischem Schwefel, wobei sehr viele Verbindungen flüchtig sind und geruchsbelästigende und toxische Eigenschaften aufweisen. Eine Übersicht der im Abwasser enthaltenen organischen und anorganischen Schwefelverbindungen geben die Abb. 2.1 und Abb. 2.2 /1/.

Während des Transports zur Kläranlage finden im Abwasser Umsetzungen statt, die u.a. zur Mineralisierung organischer Schwefelverbindungen führen (Sammler als Bioreaktor). Das Endprodukt des aeroben Abbaus ist Schwefelsäure. In

teilgefüllten Abwasserkanälen laufen reduktive und oxidative Umsetzungen des Schwefelkreislaufes räumlich getrennt ab. In Abbildung 2.3 sind diese Umsetzungen schematisch wiedergegeben.

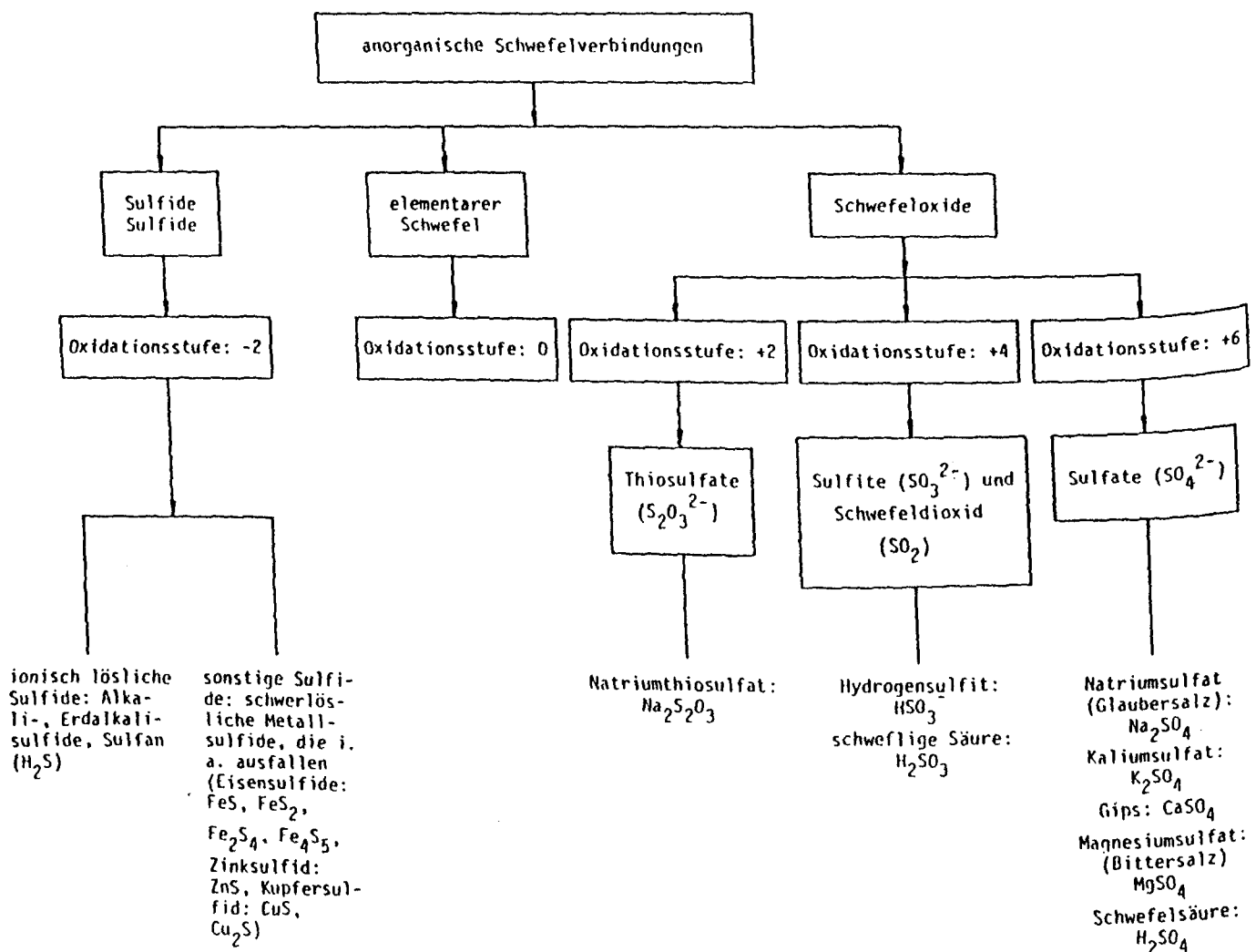


Abb. 2.1 Anorganische Schwefelverbindungen im Abwasser mit Bei- spielen nach Lohse /1/



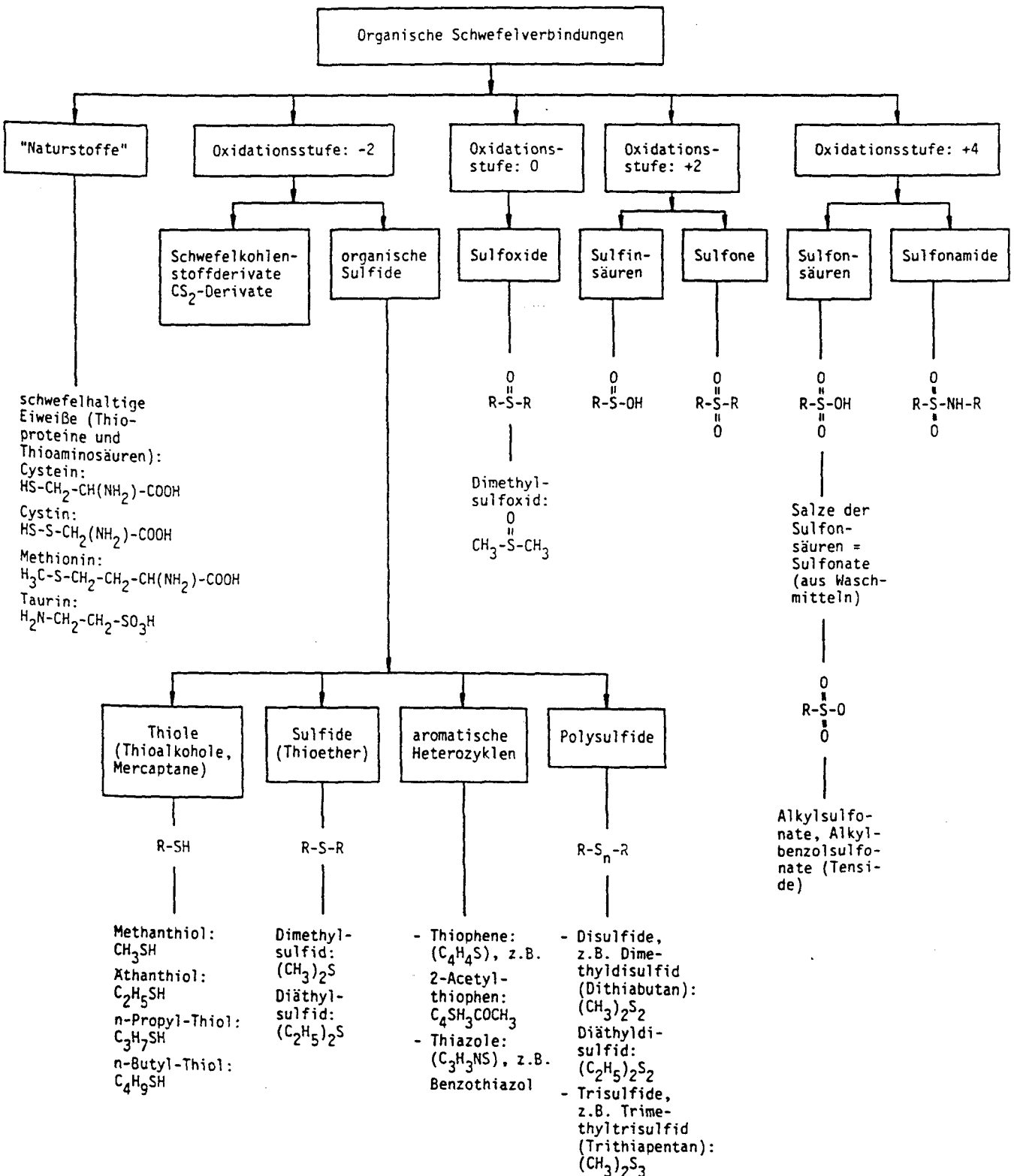


Abb. 2.2 Organische Schwefelverbindungen im Abwasser mit Bei- spielen nach Lohse /1/

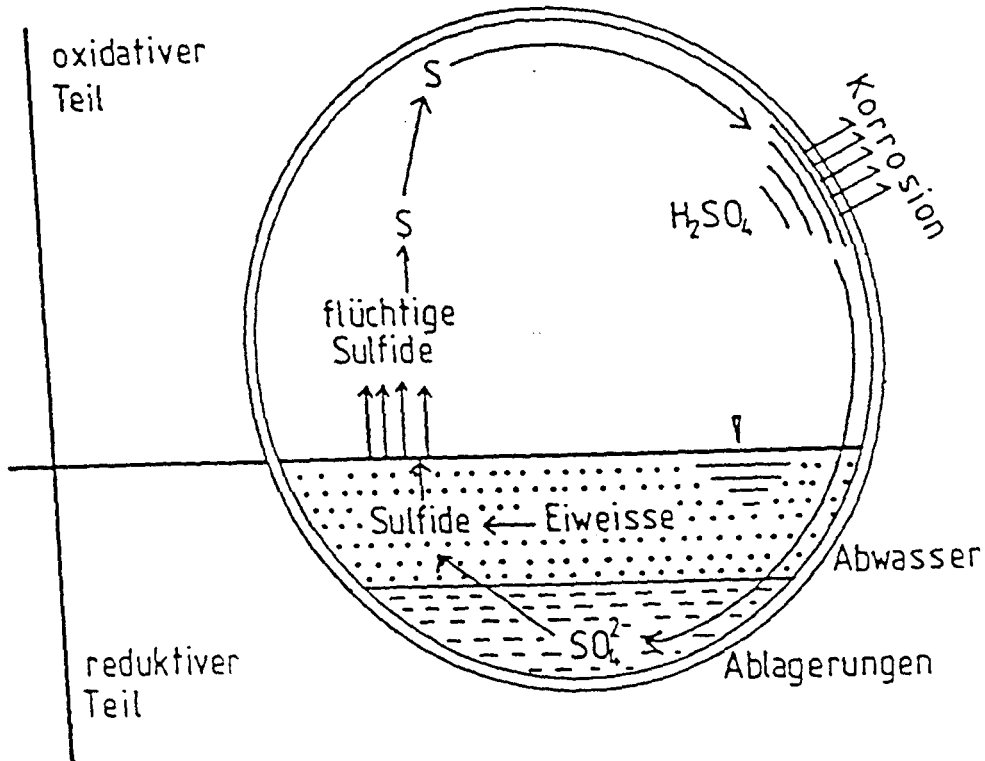


Abb. 2.3 Räumliche Trennung des Schwefelkreislaufs in einem teilgefüllten Abwasserkanal in einen überwiegend oxidativen und einen überwiegend reduktiven Teil /2/

Bei durchschnittlichen Temperaturen von ca. 15 °C werden eiweißhaltige Verbindungen in Aminosäuren gespalten. Aus den Aminosäuren Cystein und Methionin werden Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), Methylmercaptan, Dimethylsulfid und organische Polysulfide freigesetzt (reduktive Umsetzungen des Schwefelkreislaufs). Da die entstandenen, reduzierten Schwefelverbindungen im Abwasser nicht schnell genug oxidiert werden, gelangen sie in die Rohratmosphäre und von dort an die Rohrrinnenwand. Der verhängnisvolle Prozeß der biogenen Schwefelsäurebildung an der Kanalwand kann somit einsetzen (oxidative Umsetzungen des Schwefelkreislaufs) /2/.

Die Schwefelverbindungen der häuslichen Einleitungen stammen aus Trinkwasser (z.B. Sulfate), Waschmitteln (z.B. Tenside), Fäkalien (z.B. Sulfat, Methan-thiol, Schwefelwasserstoff), Speiseresten (z.B. Fleisch, Fisch), Haushalt-schemikalien (z.B. Sulfoxide aus Lösemitteln und Klebstoffen), Überläufen aus Hauskläranlagen oder Fäkalschlammsammelräumen (z.B. Sulfide), Fremdwasser (z.B. Sulfate aus Grundwasser) usw..

Aus gewerblichen und industriellen Einleitungen fallen Abwässer mit oxidierten und reduzierten Schwefelverbindungen an (z.B. Lebensmittelindustrie, Tierverwertungsbetriebe, chemische Industrie, Zellstoff- und Papierindustrie, Textilindustrie, landwirtschaftliche Betriebe, Erzaufbereitungsanlagen, metallverarbeitende Industrie, mineralöl- und brennstoffverarbeitende Industrie).

Schwefel in oxidierten Verbindungen wird unter bestimmten Umständen reduziert. Die reduzierten Schwefelverbindungen sind oft leicht flüchtig und stellen, sobald sie in die Kanalatmosphäre gelangt sind, eine Quelle für Sulfidprobleme dar. Bei proteinhaltigen Abwässern ist die Bildung flüchtiger Schwefelverbindungen besonders zu befürchten /1/.

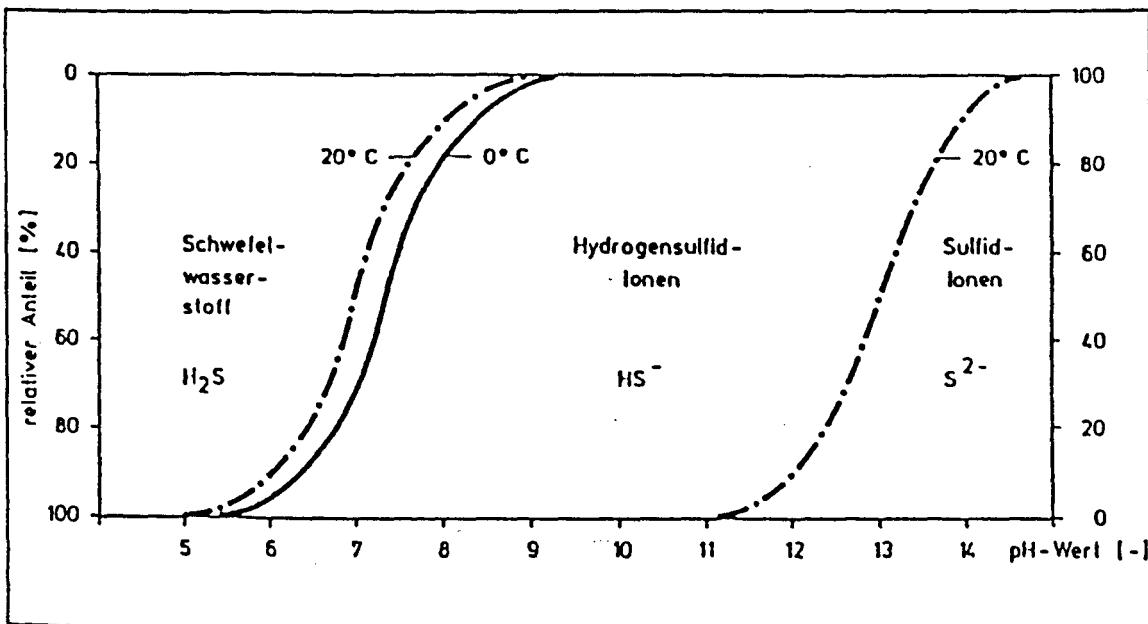


Abb. 2.4 Bildungsformen von gelöstem Sulfid-Schwefel in Abh. vom pH-Wert und der Temperatur /3/

Abwässer, die Sulfidprobleme verursachen, enthalten in den meisten Fällen gelösten Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), auf den im folgenden etwas näher eingegangen werden soll. Im Abwasser stellt sich das Verhältnis zwischen dem molekularen

Schwefelwasserstoff und den Hydrogensulfidionen in starker Abhängigkeit vom pH-Wert und in einer schwachen Abhängigkeit von der Temperatur ein. Im üblicherweise schwach alkalischen, häuslichen Abwasser mit einem pH-Wert von beispielsweise 8,0 und einer Temperatur von 20 °C beträgt der Anteil des Schwefelwasserstoffs am Sulfidschwefel ca. 15% (Abb. 2.4).

Kommt es in einem Kanal zur Einleitung saurer, industrieller Abwässer in ein sulfidhaltiges Abwasser, wird durch die pH-Wert-Absenkung Schwefelwasserstoff aus dem Abwasser freigesetzt. Bei einem pH-Wert von 6,5 liegen bereits 80% des Sulfidschwefels als Schwefelwasserstoff vor. Es können dadurch örtlich derart hohe Sulfidgaskonzentrationen in der Kanalatmosphäre auftreten, daß dies für das Wartungspersonal tödlich sein kann /1/.

Schwefelwasserstoff in Lösung hat den Charakter einer schwachen Säure, die für die Betonkorrosion praktisch bedeutungslos ist. Die Dissoziation erfolgt gemäß der Gleichung 2.1:



Die Dissoziation der Hydrogensulfidionen ( $\text{HS}^-$ ) ist für Abwasser im allgemeinen nicht von Bedeutung, weil pH-Werte über 11 nur sehr selten anzutreffen sind (Abb. 2.4)

### 2.3 Der Schwefelkreislauf

In lebenden Zellen liegt Schwefel hauptsächlich als Mercaptogruppe in Form von schwefelhaltigen Aminosäuren (Cystein, Methionin, Homocystein) vor. Der Anteil von Schwefel an der Trockenmasse von Organismen beträgt ca. 1% /6/. Wie alle anderen Bausteine lebender Materie durchläuft auch der Schwefel einen Zyklus mit mikrobiellen, zum Teil aber auch chemischen Umwandlungen der anorganischen zu organischen, der reduzierten zu oxidierten Verbindungen und umgekehrt, jeweils in Abhängigkeit von den Milieuverhältnissen. Diese Reaktionen laufen auch beim Abwassertransport in den Kanälen ab (s. Kap. 2.2, Abb. 2.3). Bei Fäulnisprozessen, also der anaeroben mikrobiellen Zersetzung von organischen Substanzen (Thioaminosäuren), werden die Mercaptogruppen durch Desulfurasen (Enzyme) abgespalten, und es kommt zum Freisetzen von

Schwefelwasserstoff, Polysulfiden und anderen flüchtigen Schwefelverbindungen. Man bezeichnet die Bildung von Schwefelwasserstoff im Zuge der Mineralisation unter anaeroben Bedingungen auch als Desulfuration (Abb. 2.5).

Unter aeroben Bedingungen ist Schwefelwasserstoff nicht sehr beständig und wird entweder chemisch zu elementarem Schwefel oder durch chemoautotrophe sulfid- und schwefeloxidierende Bakterien unter biochemischem Energiegewinn bis hin zum Sulfat oxidiert und hat somit auf die Korrosion keinen Einfluß. Ebenfalls bei anaeroben Verhältnissen werden anorganische Schwefel-Sauerstoff-Verbindungen im Zuge der dissimilatorischen Sulfatreduktion (Protein-Stoffwechsel, Sulfatatmung) durch spezialisierte Bakterien, den Desulfurikanten, zu Sulfid reduziert /6/. Dieser Prozeß wird auch als Desulfurikation bezeichnet. Die überwiegende Menge des in der Natur auftretenden Schwefelwasserstoffs entsteht auf diesem Wege!

Die sulfatreduzierenden Bakterien sind ein wesentlicher Bestandteil im Schwefelkreislauf. Wie in Abb. 2.5 dargestellt ist, umgehen sie die assimilatorische Sulfatreduktion und produzieren  $H_2S$  in ausreichender Menge, um das Wachstum der sulfid- und schwefeloxidierenden Bakterien zu unterstützen. Gemeinsam bilden sie ein mikrobielles Ökosystem, das aus voneinander abhängigen, schwefeloxidierenden und sulfatreduzierenden Bakterien besteht und ein "Sulfuretum" genannt wird. Ihre Stoffwechsel-Aktivitäten haben entweder direkt oder indirekt durch den Schwefelkreislauf eine Vielzahl von ökologischen und ökonomischen Folgen.

Die Bakterien, die Schlüsselrollen in der gesamten Sulfatatmung spielen, benutzen die Oxidation von Schwefel bzw. die Reduktion von Sulfat, um den Hauptteil ihrer Energiebedürfnisse zu befriedigen /7/. Desulfurikanten sind ubiquitär und werden im Kanal vorwiegend in der Sielhaut oder in Sohlablagerungen angetroffen, wo sie sich massenhaft entwickeln können. Als Endprodukt bei der Desulfurikation entsteht ausschließlich Schwefelwasserstoff /9/. Desulfurikanten sind sehr säuretolerant und in weiten Grenzen anpassungsfähig (Temperaturbereich von -5 bis +75 °C; pH-Werte-Bereich von < 5 bis 9,5) /7/. Sie sind obligat anaerob, jedoch werden sie bei geringem Sauerstoffgehalt nicht getötet, sondern nur inaktiv. Ihr für andere Organismen giftiges Stoffwechselprodukt Schwefelwasserstoff können sie bemerkenswert gut ertragen; unter sonst optimalen Lebensbedingungen bis 2.000 mg/l /8/.

Erfolgt die Oxidation von Schwefel im Abwasser, führt das normalerweise aufgrund der Pufferkapazität des Abwassers zu keiner beachtenswerten pH-Wert-Ab-senkung. Hingegen ist in einem ungepufferten System, z.B. im Kondenswasser, das sich an Kanalinnenwänden bildet, sehr schnell ein niedriger pH-Wert er-reicht, der somit die Bildung von Schwefelwasserstoff begünstigt (vgl. Abb. 2.4).

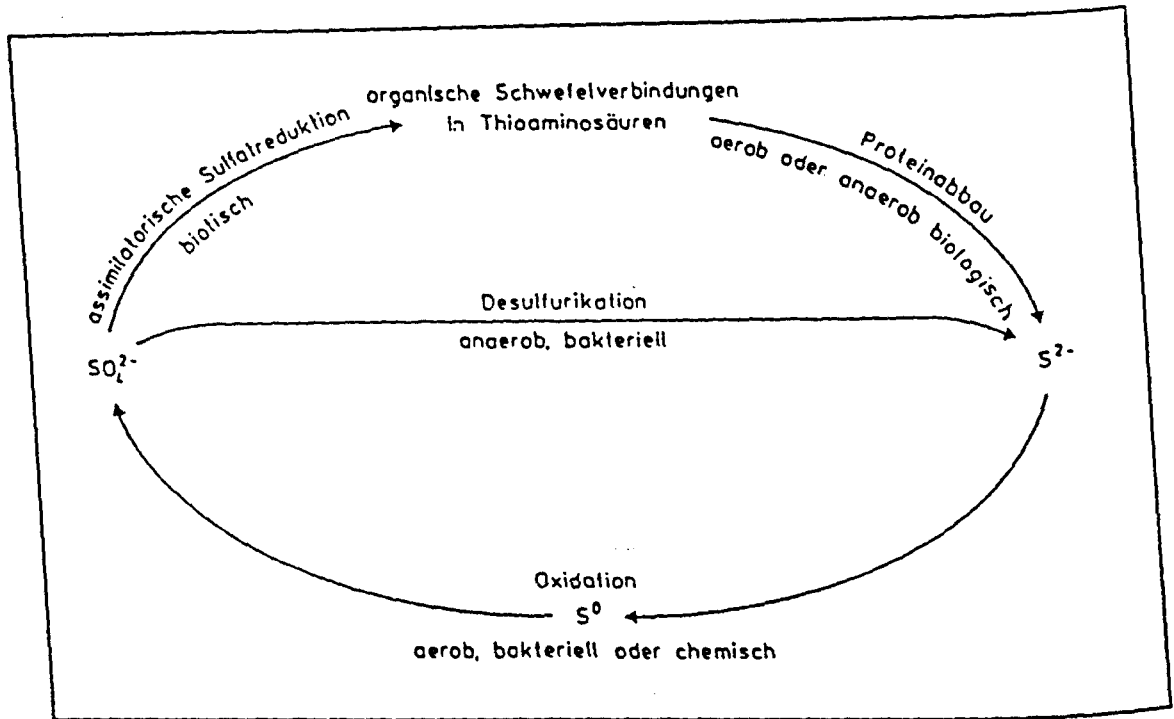


Abb. 2.5 Hauptwege des Schwefelkreislaufs, verändert nach Schlegel /6/

## 2.4 Zusammenfassung

Abwasser enthält Schwefel in vielen verschiedenen Oxidationsstufen. Als Schwefelquellen sind hauptsächlich das bereits im Trinkwasser enthaltene Sulfat sowie Bestandteile in Waschmitteln, Harn, Kot, Nahrungsmittelresten, Haushaltschemikalien und in eingeleiteten speziellen gewerblichen und industriellen Abwässern zu nennen. In besonderer Abhängigkeit vom pH-Wert und der Temperatur können reduzierte, unangenehm riechende und zum Teil toxisch wirkende Schwefelverbindungen (z.B.  $\text{H}_2\text{S}$ , Polysulfide usw.) entstehen. Sobald die Schwefelverbindungen in die Kanalatmosphäre gelangen, stellen sie eine potentielle Quelle für Sulfidprobleme dar.

Reduzierte Schwefelverbindungen entstehen mikrobiell durch Desulfurikanten, vorwiegend unter anaeroben Verhältnissen (Desulfurikation). Daneben werden aber auch durch den Abbau von Thioproteinen, der sowohl aerob als auch anoxisch ablaufen kann (Desulfuration), Schwefelverbindungen gebildet.

Die Desulfurikanten sind ubiquitär und im Kanal vorwiegend in der Sielhaut angesiedelt, wo sie optimale Lebensbedingungen vorfinden. Sie sind äußerst säuretolerant und in weiten Grenzen anpassungsfähig. Als Endprodukt entsteht bei der Desulfurikation ausschließlich Schwefelwasserstoff, der für die Korrosion zementgebundener Baustoffe verantwortlich zu machen ist.

### 3 DIE BIOGENE-SCHWEFELSÄURE-KORROSION IN ABWASSERKANÄLEN

#### 3.1 Einleitung

Neben den allgemein bekannten Schadensursachen an Abwasserkanälen, wie Verle-  
gefehler beim Rohreinbau, unsachgemäße Auswahl der Rohrmaterialien, mechani-  
sche Einwirkungen, mangelhaft ausgeführte Rohrverbindungen und Hausanschlüsse  
sowie Einleitung von aggressiven Abwässern usw., stellt die Biogene-Schwefel-  
säure-Korrosion (BSK) eine der Hauptursachen für das Versagen von Kanälen  
dar. Im folgenden Kapitel wird das Zusammenspiel vieler verschiedener am Kor-  
rosionsprozess beteiligter Faktoren beschrieben sowie Aussagen über Schaden-  
ursachen, Schadensverlauf, Schadensarten und Schadensbilder getroffen. Lie-  
gen eindeutige Erkenntnisse über diese Punkte vor, lassen sich in einem wei-  
teren Schritt geeignete Maßnahmen zum Schutz der Kanäle oder für eventuell  
durchzuführende Sanierungsvorhaben erarbeiten.

#### 3.2 Bedingungen für die Biogene-Schwefelsäure-Korrosion (BSK)

Für das Zustandekommen einer Schwefelsäurekorrosion müssen der Reihenfolge  
nach die folgenden 6 Voraussetzungen gegeben sein /4/:

1. Es müssen gelöste Sulfide im Abwasser enthalten sein. Sie stammen vornehm-  
lich aus organischen Abfallstoffen oder entstehen biogen unter anaeroben  
Bedingungen (Desulfurikation) und durch den Abbau schwefelhaltiger Pro-  
teine (aerob oder anoxisch).
2. Die reduzierten Schwefelverbindungen müssen in freier und flüchtiger Form  
im Kanal vorliegen.
3. Durch Strippvorgänge und Aerosolbildung muß es zur Emission der flüchtigen  
Schwefelverbindungen in den Kanalgasraum kommen.
4. Ein Teil des Schwefelwasserstoffgases muß über die Abwasserluft an die  
Oberfläche der Bauteile oberhalb des Wasserspiegels gelangen.
5. Die Sulfide, die an die Oberfläche der Bauteile gelangen und nicht regel-  
mäßig durch das Abwasser abgewaschen werden, müssen dann bis zur Schwefel-  
säure aufoxidieren. Diese Aufoxidation ist im wesentlichen das Ergebnis  
der Tätigkeit von Thiobacillen.



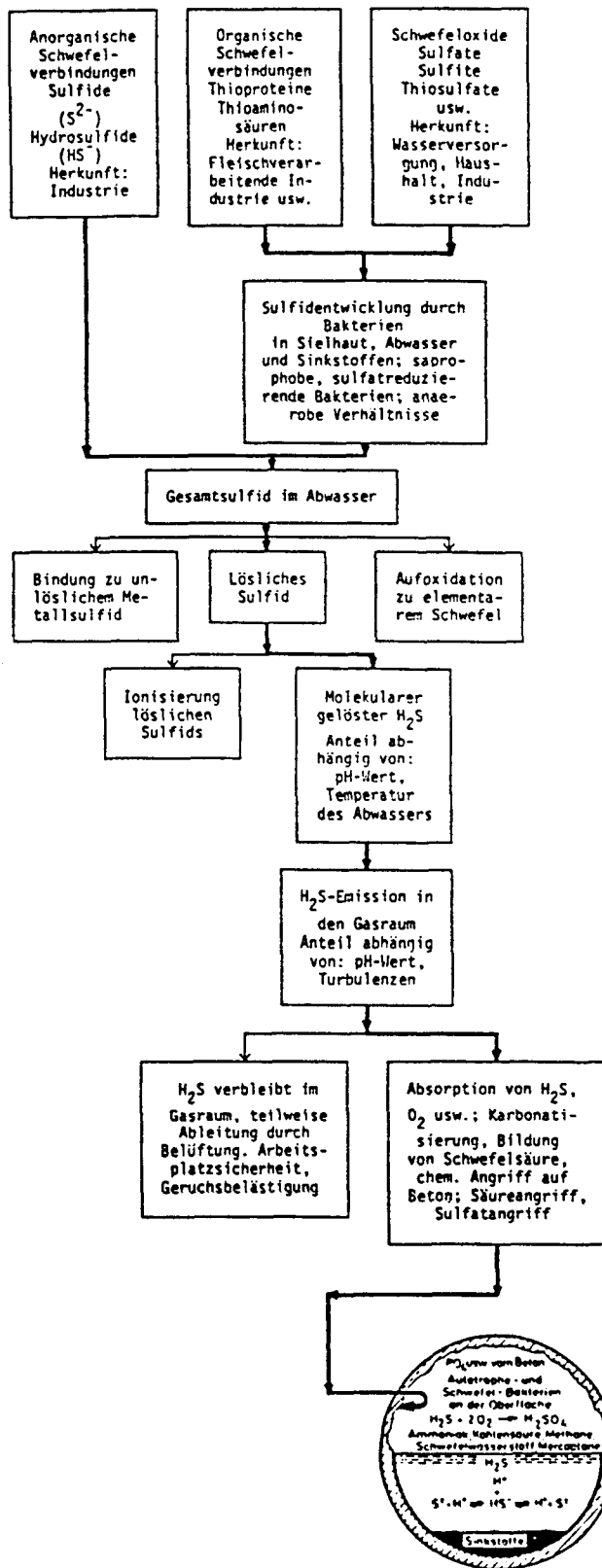


Abb. 3.1 Ablauf der BSK nach Thistlethwayte /4/

6. Die letzte Stufe ist bei zementgebundenen Rohren ein fortschreitender chemischer Angriff durch Schwefelsäure und Sulfat. Die von den Thiobacillen als Stoffwechselprodukt erzeugte Säure muß nur noch ungehindert an korrosionsunbeständige Bauteile gelangen.

Die Schwefelsäurekorrosion kann durch Verhinderung eines jeden einzelnen Schrittes oder durch Veränderung der Reihenfolge verringert oder vermieden werden. Der gesamte Vorgang der BSK ist zur Verdeutlichung in Abb. 3.1 dargestellt /3;4/.

### 3.3 Einflüsse bei der Entstehung und Umsetzung von Sulfid

#### 3.3.1 Der Sauerstoffhaushalt

Sulfidprobleme sind immer eng mit dem Sauerstoffhaushalt des Abwassers verknüpft. Grundsätzlich läßt sich vereinfachend sagen (vgl. Kap. 2.3):

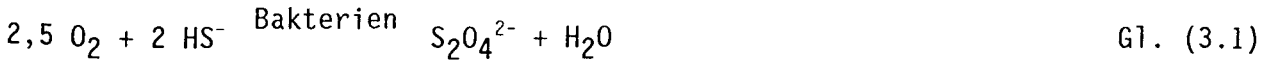
- kein Sauerstoff → viel Sulfid
- viel Sauerstoff → kein Sulfid

Nach dem Sauerstoffgehalt läßt sich das Abwasser in drei Arten unterscheiden:

- aerobes Abwasser : enthält gelösten Sauerstoff
- anoxisches Abwasser: enthält keinen gelösten, aber chemisch gebundenen und mikrobiell verwertbarer Sauerstoff
- anaerobes Abwasser : enthält weder gelösten noch chemisch gebundenen und mikrobiell verwertbaren Sauerstoff

Wie noch im Kapitel 3.4 gezeigt wird, tragen insbesondere die Aktivitäten der Mikroorganismen im anoxischen Bereich zur Sulfidbelastung des Abwassers bei. Durch mikrobielle und zum Teil auch chemisch oxidative Prozesse im Abwasser wird Sauerstoff verbraucht. Die Mikroorganismen gelangen durch menschliche und tierische Fäkalien, mit Boden aus Straßeneinläufen oder durch Luftaustausch in den Abwasserkanal. Die sauerstoffzehrenden Mikroorganismen werden im Abwasser mitgeführt und siedeln sich dann in der Sielhaut an, wo sie geeignete Verhältnisse vorfinden, um sich zu vermehren. Ihr Wachstum und damit

der spezifische Sauerstoffverbrauch wird durch das Nährstoffangebot im Abwasser bestimmt. Die Sulfatbildung im aeroben Abwasser durch Bakterien nach der Reaktionsgleichung:



ist eine sehr viel schnellere Reaktion als die chemische Oxidation von Sulfid zu Sulfat und anderen Produkten, die bei geringen Sauerstoffgehalten sehr langsam verläuft und von der Sulfid- und Sauerstoffkonzentration des Abwassers abhängig ist.

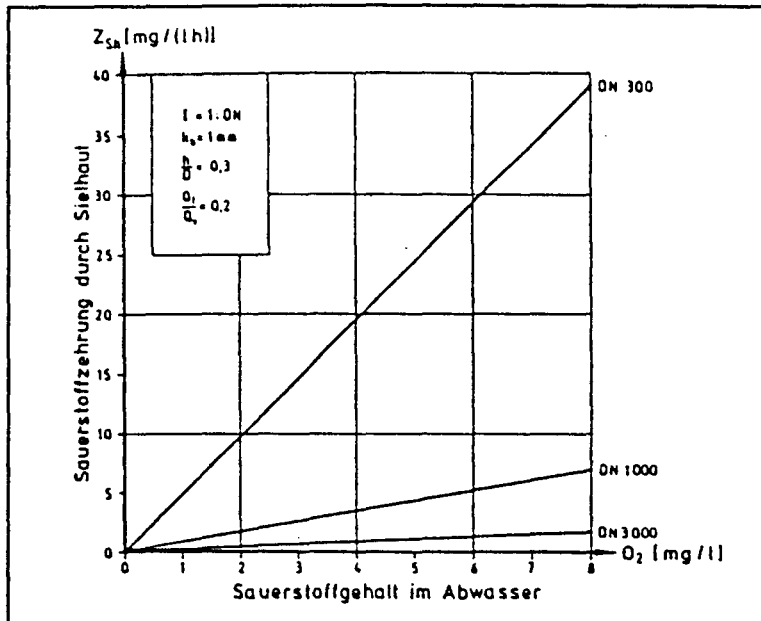


Abb. 3.2 Sauerstoffzehrung der Sielhaut in Freigefälleleitungen /10/

Der Anteil der Sauerstoffzehrung durch submerse Sielhaut ist in Druckleitungen und in Kanälen mit geringen Durchmessern von Bedeutung, während in großen Sammlern mit großem hydraulischen Radius der Sauerstoffverbrauch durch die Sielhaut eher gering ist (Abb. 3.2) /10/. Untersuchungsergebnisse über die Sauerstoffzehrung durch Mikroorganismen in Ablagerungen waren der gesichteten Literatur nicht zu entnehmen. Es ist aber davon auszugehen, daß sich auf den Ablagerungsoberflächen ein sielhautähnlicher sauerstoffzehrender Bewuchs bildet, der mit der Sielhaut vergleichbare Zehrungsraten aufweist /3/. Der Sau-

erstoffeintrag in das Abwasser erfolgt über die Abwasseroberfläche durch Turbulenzen. Er ist von vielen Einflüssen abhängig wie z.B. vom Sauerstoffdefizit, vom  $O_2$ -Partialdruck, den Druckverhältnissen, der Temperatur, der Dichte, der Viskosität, der Oberflächenspannung, der Rohrgeometrie, der Rohrrauigkeit, dem Grad der Turbulenz, dem Salzgehalt, dem Detergenziengehalt sowie den chemischen und biochemischen Reaktionen zwischen aufgenommenem Sauerstoff und Flüssigkeitsbestandteilen.

### 3.3.2 Die Sielhaut

Die Sielhaut ist ein flächenhafter Film aus Mikroorganismen und organischen (z.B. Zellulose) und anorganischen Materialien auf den Innenflächen von Abwasserbauwerken. Hinsichtlich ihrer Organismen ähnelt die Sielhaut dem biologischen Tropfkörperassen. Sie enthält Pilze und zoogloea-artig oder fadenförmig wachsende Bakterien, Nematoden und häufig auch zahlreiche Protozoen. Die Sielhaut kann sich sowohl auf glatten als auch auf rauen Rohroberflächen gleichermaßen gut ansiedeln. Je nach Standort ist die Bedeutung der Sielhaut unterschiedlich zu beurteilen. Eine Differenzierung der Sielhaut ist wie folgt möglich:

- submerse anoxische Sielhaut (Sielhaut unterhalb des Abwasserspiegels im vorwiegend anoxischen Abwasser)
- submerse aerobe Sielhaut (Sielhaut unterhalb des Abwasserspiegels im vorwiegend aeroben Abwasser)
- Gasraumsielhaut (Sielhaut oberhalb des Abwasserspiegels, die einer Kanalatmosphäre ausgesetzt ist)

Es gibt Übergangsbereiche, z.B. bedingt durch die Abwasserganglinie oder durch unterschiedliche Sauerstoffkonzentrationen in Abwasser. Durch Mikroorganismen der Sielhaut erfolgen Stoffumsetzungen, z.B. der Abbau von Harnstoff zu Ammonium und Kohlendioxid, von Fetten, Proteinen und Kohlenhydraten zu organischen Säuren und von Sulfat zu Sulfid.

Bevor näher auf die einzelnen Sielhautbestandteile eingegangen wird, zunächst einige grundlegende Ausführungen zum Ort der Entwicklung und dem Wachstumsverhalten der Sielhaut. Bestimmender Faktor für die Menge der entstehenden Sulfide in Abwasseranlagen ist die Anzahl vorhandener sulfatreduzierender Mi-

kroorganismen. Die Sichelhaut, die sich an den Wänden der Kanalrohre ansiedelt, bietet die besten Bedingungen für die Entwicklung dieser Organismen. Bei Untersuchungen an Versuchsröhrleitungen konnte folgendes festgestellt werden:

1. Das Gewicht der Sichelhaut, bezogen auf die mittlere Dicke, wuchs zunehmend innerhalb eines Zeitraumes von etwa zwölf Wochen. Danach wurde nur noch eine geringe Gewichtszunahme der Sichelhaut beobachtet. Die Wachstumsrate der Sichelhaut ist zunächst hoch, danach abnehmend. Zwei typische, im Labor ermittelte Sichelhautentwicklungen werden in Abb. 3.3 dargestellt.

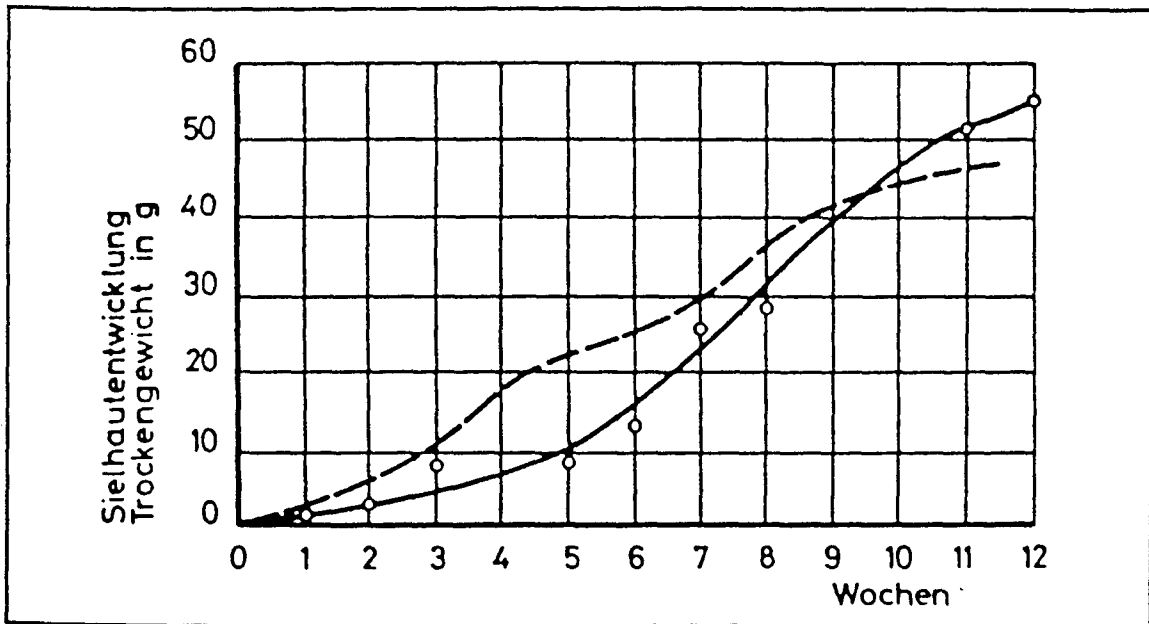


Abb. 3.3 Sichelhautentwicklung in Abwasseranlagen in Abh. von der Zeit /4/

2. Während das Abwasser selbst keine Sulfide enthielt, wies die Sichelhaut sehr hohe Sulfidkonzentrationen auf. Dieses läßt darauf schließen, daß die Sichelhaut der Hauptfaktor für die Sulfidentwicklung ist.
3. Die mittlere Sichelhautdicke ist abhängig von den Fließgeschwindigkeiten des Abwasserstroms; die Dicke nimmt zu bei kleineren Abwassergeschwindigkeiten.
4. Ist die Sichelhaut voll entwickelt, nimmt die Abflußgeschwindigkeit ab, was eine Verringerung der Abflußleistung zur Folge hat /4;3/.

Die Dicke der Sichelhaut ist wiederum von vielen Faktoren abhängig, die im folgenden kurz wiedergegeben werden:

- Sie ist verschieden über den benetzten Querschnitt der Rohrleitung verteilt.
- Sie hat eine systematisch verteilte unterschiedliche Dicke. Die Sichelhaut ist, im Bereich kurz unter dem niedrigsten täglichen Abflußspiegel, im allgemeinen am größten, aufgrund der dort herrschenden guten Milieubedingungen (Abb. 3.4).
- An der Außenseite von Kurven ist die Dicke ebenfalls geringer (kritische Wandschubspannungen).
- Je frischer das Abwasser ist, umso geringer ist das Sichelhautwachstum.
- Bezüglich der Sichelhautdicke ist kein signifikanter Unterschied zwischen aeroben und anaeroben Verhältnissen festzustellen, was auf den Einfluß der Abwasserfließgeschwindigkeit zurückzuführen ist /11/.

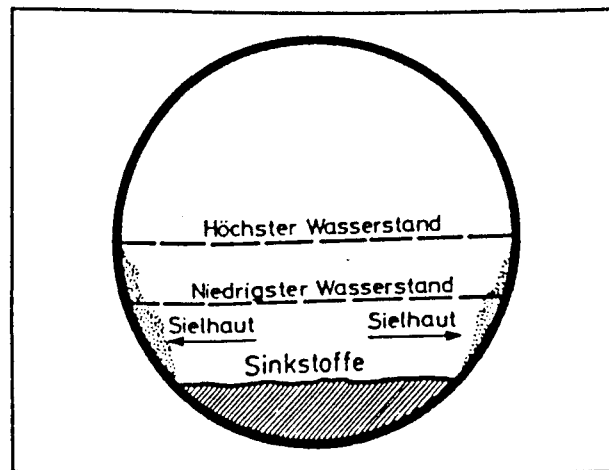


Abb. 3.4 Schichtdicke und Verteilung der Sichelhaut in Kanalrohren /4/

Fehlende Sichelhaut läßt vermuten, daß die Bedingungen für eine Sulfidentwicklung nicht ausreichend oder gar nicht vorhanden sind /4/. Die submerse Sichelhaut erhält Nährstoffe aus dem vorbeifließenden Abwasser. Durch den Verbrauch der Nährstoffe werden organische Inhaltsstoffe abgebaut und schädliche Abbauprodukte gelangen auf diesem Wege ins Abwasser. Submerse aerobe Sichelhaut ist aus drei, submerse anoxische Sichelhaut aus zwei unterschiedlichen Schichten aufgebaut (Abb. 3.5) /1/. Bei aeroben Abwasserverhältnissen besteht die Sichel-

haut aus einer außen liegenden ca. 0,1 bis 0,3 mm dicken aeroben Schicht, durch die in die darunter liegenden anoxischen Schicht, die mit Desulfurikanten besiedelt ist, Sauerstoff und Nährstoffe eindringen. Die Dicke der desulfurierenden Schicht beträgt, aufgrund der geringer werdenden Nährstoffversorgung, ebenfalls nicht mehr als 0,3 mm /10/. Das von den Desulfurikanten gebildete Sulfid diffundiert ins Abwasser und wird mikrobiell an der Sielautoberfläche oxidiert.

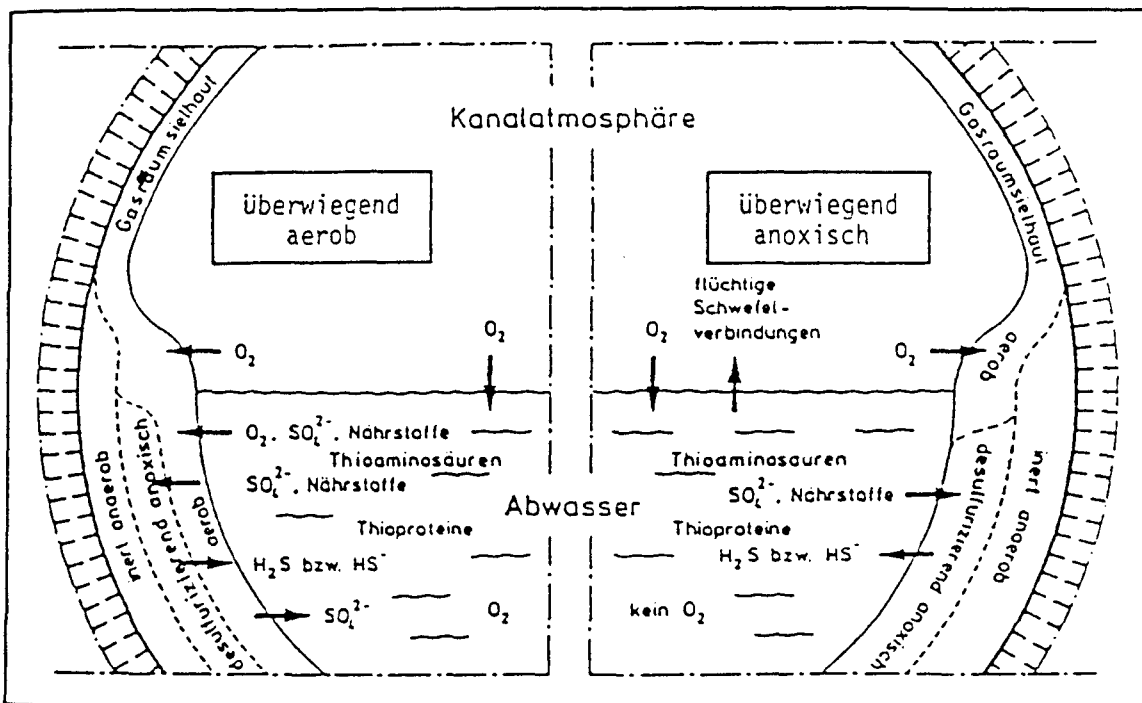


Abb. 3.5 Aufbau und Abbauvorgänge in der Sielhaut abgeändert nach /10,12/

Bei niedrigen Sauerstoffkonzentrationen kann nur ein Teil des Sulfides oxidiert werden, so daß das nicht oxidierte Sulfid ins Abwasser gelangt. Unterhalb des Bereiches mit Desulfurikanten ist die Sielhaut inert anaerob und wegen der fehlenden Nährstoffe inaktiv. Bei anoxischen Verhältnissen fehlt die äußere Schicht der Sielhaut /1/. Abb. 3.6 zeigt einen vergrößerten Querschnitt einer Sielhaut bei überwiegend aeroben Verhältnissen im Abwasserkanal. Sauerstoff, organische Nährstoffe und Sulfate durchdringen die Sielhaut. Der Sauerstoff und ein Teil der Nährstoffe werden in der aeroben Zone ver-

braucht. Sulfate und der Rest der organischen Nährstoffe dringen tiefer bis zur anaeroben Schicht durch.

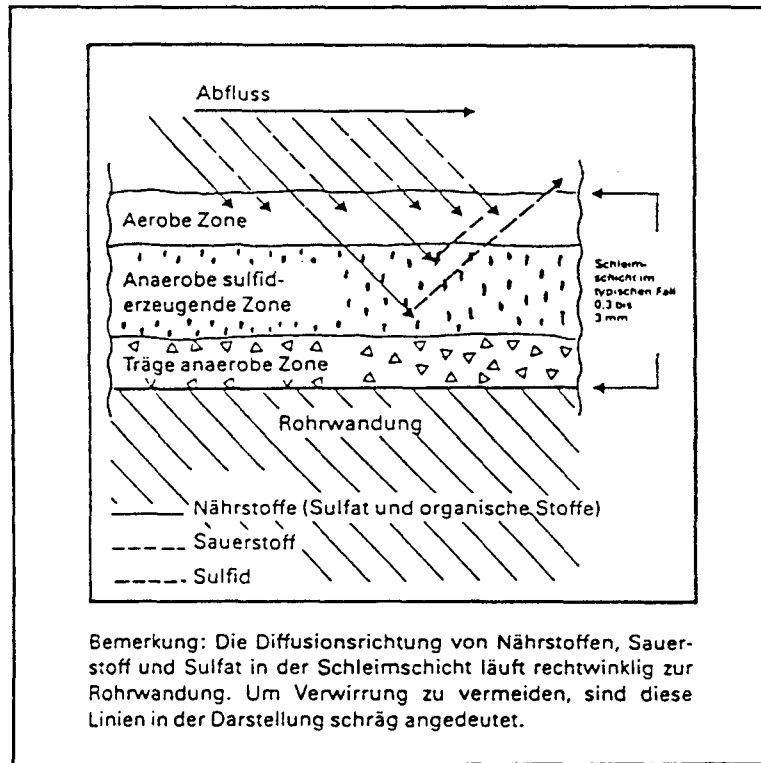


Abb. 3.6 Querschnitt der Sichelhaut eines Abwasserkanals bei überwiegend aeroben Verhältnissen nach Pomeroy /12/

Die dort vorhandene hohe Konzentration an anaeroben Bakterien, besonders der Art "Desulfovibrio desulficans", ist für die sulfidbildende Reaktion verantwortlich und zwar in dem Maße, wie Nährstoffe zur Verfügung stehen. Das entstandene Sulfid diffundiert aus der Sichelhaut, wobei ein Teil in der aeroben Zone zu Thiosulfat oxidiert wird und der Rest in den Abfluß entweicht. Dies passiert insbesondere bei niedrigen Konzentrationen von Sauerstoff, so daß in einem solchen Fall die Möglichkeit einer Sulfidanreicherung im Abwasser besteht. Dadurch wird, während das Abwasser die Rohrleitung entlang fließt, die Sulfidkonzentration im Abwasser laufend gesteigert /12/.

Bei Untersuchungen konnte der Nachweis geführt werden, daß sowohl in Druckleitungen, als auch in Freispiegelleitungen in der submersen Sichelhaut ca.  $10^8$



Desulfurikanten pro  $\text{cm}^3$  Sichelhaut vorhanden waren. Zum Vergleich dazu befinden sich in einem Faulschlamm nur ca.  $10^4$  bis  $10^5$  pro  $\text{cm}^3$  /1/.

Die Gasraumsichelhaut kann sehr unterschiedlich ausfallen, z.B. als flächenhafte, erdfeuchte, schmierende (bei Kondensation) oder als krümelige, nicht schmierende Substanz. Vereinzelt ist sie kaum zu erkennen, obwohl eine Vielzahl von Mikroorganismen nachgewiesen werden können. Bei Korrosion enthält sie ferner Korrosionsprodukte. Die Gasraumsichelhaut ist aerob und von brauner Farbe.

Die Mikroorganismen unmittelbar oberhalb des Abwasserspiegels werden mit Nährstoffen aus Spritzern der turbulenten Abwasserströmung versorgt, während an die Sichelhaut im Scheitelpunkt der Rohre Nährstoffe als Aerosole aus der Kanalatmosphäre gelangen oder aus gelegentlichen Rückstauereignissen stammen. Ihre Dicke beträgt im wesentlichen weniger als 1,0 mm, sie kann aber auch mehrere Millimeter ausmachen. Die Gasraumsichelhaut ist stets mit Thiobacillen verschiedener Gattungen infiziert. Obwohl keine eindeutigen Erkenntnisse vorliegen, scheint die Sichelhaut eher eine fördernde als hemmende Wirkung auf das Wachstum von Thiobacillen zu haben. In der Gasraumsichelhaut wurden bei Untersuchungen in Hamburg stets Thiobacillen in einer Größenordnung von  $10^6$  bis  $10^8$  pro mg Protein gefunden /13/. Zwischen der Sichelhautdicke und der Sulfidentwicklung scheint kein straffer Zusammenhang zu bestehen; mit bedeutenden Sulfidentwicklungen ist vermutlich erst bei stärkeren Sichelhautdicken ab 1,0 mm zu rechnen /1/.

### 3.3.3 Die Sohlablagerungen

Mit dem Abwasser mitgeführte Feststoffe sinken zur Kanalsohle ab, sobald die kritische Fließgeschwindigkeit unterschritten wird. Grobes Material wird bei ständiger Sohlbewegung rollend und gleitend mit einer wesentlich langsameren Geschwindigkeit als der des Abwassers transportiert. Bei zu geringer Schubkraft bleibt das Material liegen. Ablagerungen ordnen sich in mehr oder weniger regelmäßigen Abständen in charakteristischen Oberflächenformen wie Riffeln oder Unterwasserdünen an. Die Ablagerungen stammen sowohl aus Schmutzwasser (z.B. Gemüsausräumungsrückständen), als auch aus Regenwasser (z.B. Verunreinigungen von Straßenoberflächen) oder aus Fremdwasser (z.B. eingetragener Boden bei Rohrschäden). Einige Ursachen für Sohlablagerungen sind:

- geringe Abflußgeschwindigkeit (z.B. Nachts, am Wochenende)
- Rückstau durch hydraulische Überlastung
- erhöhter Feststoffeintrag
- Planungs-, Bauausführungs-, Betriebsfehler

Folgende Auswirkungen durch Sohlablagerungen verursachen hydraulisch andere Sulfidprobleme:

- Einengen des Fließquerschnittes; dadurch Verringerung des Stauraumvolumens
- Verminderung der Abflußgeschwindigkeit durch größere Oberflächenreibung; dadurch Gefahr weiterer Ablagerungen und Verlängerung der Fließzeit bis zur Kläranlage
- Erheblich längere Transportzeiten der Feststoffe; dadurch gewinnen die biologischen und biochemischen Prozesse im Kanal an Bedeutung
- "Korrosionsquelle" bei Desulfurikation
- Beitrag zur Animpfung des Abwassers mit Desulfurikanten

Über die Größenordnung von Sulfidbildungen in Sohlablagerungen liegen keinerlei Erkenntnisse vor. Daß durch den Geschiebetransport Abriebschäden auftreten, kann nach langen Beobachtungszeiträumen auch bei minderwertigen Rohrmaterialien nicht bestätigt werden /1/. Es konnte aber gezeigt werden, daß die Sulfidproduktion in den Sohlablagerungen stark von der Fließgeschwindigkeit des Abwassers abhängt. Bei Fließgeschwindigkeiten größer 0,6 m/s ist keine Sulfidproduktion zu beobachten. Mit abnehmender Geschwindigkeit des Abwassers steigt die Sulfidproduktion ständig an. Ab einer Fließgeschwindigkeit kleiner 0,3 m/s ist mit sehr starker Sulfidproduktion zu rechnen /10/.

#### 3.3.4 Die Kanalatmosphäre in Freispiegelleitungen

Das Gas oberhalb des Abwasserspiegels hat als Transportmittel für flüchtige Schwefelverbindungen und Mikroorganismen aus dem Abwasser eine große Bedeutung. Gasbewegungen werden im allgemeinen durch natürliche Druckdifferenzen erzeugt. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gases wird im wesentlichen durch den Gasraumquerschnitt, die Leitungsführung, durch "Kaminwirkung", Temperaturunterschiede zwischen Abwasser, Gasraum, Leitungswand und Außenluft sowie durch Druckunterschiede zwischen Druckleitungen und Freispiegelleitungen u.a.m. beeinflusst.

Die Strömungsrichtungen von Abwasser und Gas sind im Sommer temperaturbedingt gleichgerichtet, wenn die Kanalluft kälter als die Außenluft ist und an den tiefergelegenen Bereichen herausgedrückt wird. Im Winter erfolgt dagegen, durch die aufsteigende Bewegung der wärmeren Kanalluft, zumeist eine Gasströmung entgegen der Abwasserfließrichtung.

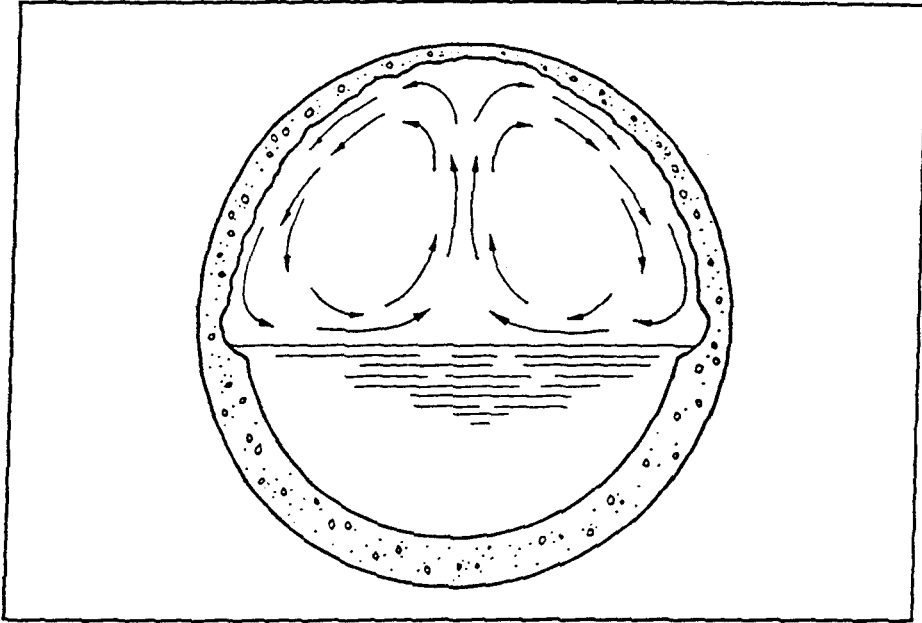


Abb. 3.7 Strömungsbild in einem Kanalquerschnitt im Sommer /10/

Im Sommer, wenn die Konzentration flüchtiger Schwefelverbindungen, durch die vermehrte Aktivität der Bakterien höher als im Winter ist, kühlt sich die Kanalluft an der Rohrwandung ab und sinkt nach unten, während die leichte wärmere Luft im Zentrum aufsteigt und mit ihr leicht flüchtige Schwefelverbindungen in den Scheitel des Rohres transportiert werden. Dies führt, bedingt durch ein gutes Substratangebot für Bakterien, zu starken Korrosionserscheinungen in diesem Bereich (Abb. 3.7).

Die Temperatur des Gasraumes ist eine Mischtemperatur und wird im wesentlichen von der Temperatur des Abwassers und der Leitungswand bestimmt. Ein für das Milieu im Gasraum wichtiger Faktor ist die relative Luftfeuchte, die den tatsächlich vorhandenen Wasserdampfanteil, bezogen auf die Gassättigung mit

Wasser, prozentual angibt. Sie liegt im allgemeinen zwischen 70% und 95% /14/.

Bezüglich ihrer Hauptbestandteile entsprechen sich Kanalgas und oberirdische Luft; so sind auch in stark sulfidbelasteten Bereichen fast immer 20,9 Vol.-% Sauerstoff und 78,0 Vol.-% Stickstoff in der Kanalatmosphäre vorhanden. Geringere Sauerstoffgehalte treten nur in Abschnitten ohne jeglichen Gasaustausch auf. Durch Stoffwechselendprodukte der biochemischen Oxidation von organischem Material können allerdings erhöhte Kohlendioxidgehalte (bis 0,10 Vol.-%) auftreten /4/. In wässrigen Lösungen, wie z.B. im Kondenswasser an Leitungswandungen, kann die entstandene Kohlensäure zu einer pH-Wert-Ab senkung beitragen, mit der Konsequenz, daß sich im Kondenswasser verstärkt Schwefelwasserstoff bildet (vgl. Kap. 2.2).

In frischem häuslichen Abwasser sind nur wenig flüchtige Inhaltsstoffe enthalten. Diese gelangen bevorzugt mit gewerblichen und industriellen Abwässern und insbesondere unter anoxischen Bedingungen durch den Abbau von Wasserinhaltsstoffen in die Kanalatmosphäre. Dabei sind die Konzentrationen der Kohlenwasserstoffe (ca. 10% der Kohlenwasserstoffe sind chlorhaltige Verbindungen) häufig mehrere hundert Mal höher als die der Schwefelverbindungen /4,15/. In Abwasserleitungen ohne Sulfidprobleme liegen die Gehalte an flüchtigen Schwefelverbindungen unterhalb der Nachweisgrenze von 0,03 ppm; in sulfidbelasteten Abwassersystemen ergaben Messungen Schwefelwasserstoffkonzentrationen von 0,1 ppm bis  $10^3$  ppm. Die maximalen Konzentrationen flüchtiger Schwefelverbindungen werden hinter Druckleitungen oder nach Sohlabstürzen gemessen /4/. An solchen Stellen des Leitungsnetzes sind folglich die größten Schäden durch BSK festzustellen! Das Freisetzen der flüchtigen Stoffe aus dem Abwasser in die Kanalatmosphäre erfolgt durch Entgasen (z.B. Änderung des Partialdruckgefälles oder der Löslichkeit durch Temperatur- oder Druckänderungen), Aerosolbildung und Strippeffekte.

Wegen ihres hohen Dampfdruckes können vor allem  $H_2S$  (Siedepunkt bei  $-61\text{ }^{\circ}C$ ) und Methanthiol ( $CH_3SH$ ;  $+6\text{ }^{\circ}C$ ) aus dem Abwasser in größeren Mengen ausgasen. Andere Schwefelverbindungen mit niedrigerem Dampfdruck werden bei sehr turbulenten Verhältnissen ausgestrippt oder mit dem Abwasser zerstäubt. Der Konzentrationsausgleich zwischen Abwasser und Kanalgasatmosphäre erfolgt allmählich und wird durch stärkere Turbulenzen noch unterstützt. Aus dem Gehalt flüchtiger Schwefelverbindungen in der Kanalatmosphäre kann jedoch wegen der

Turbulenzen in Abwasser und Gasatmosphäre nicht auf ihren Gehalt im Abwasser geschlossen werden. Es stellt sich ein Gleichgewicht der Schwefelverbindungen des Abwassers und der Kanalatmosphäre ein. Daß sehr hohe Konzentrationen an Schwefelwasserstoff, wie sie beispielsweise in Berechnungsansätzen ermittelt werden, in der Kanalatmosphäre auch nicht annähernd erreicht werden, liegt in dem sehr langsam ablaufenden Prozeß des Gaskonzentrationsausgleiches /4/.

### 3.3.5 Die Kondensation in Freispiegelleitungen

Kondenswasser kann einen erheblichen Einfluß auf den Korrosionsfortschritt haben, da es für Stoffwechselprozesse der Thiobacillen und für den Transport der Stoffwechselprodukte benötigt wird. Die Kondensation ist eng mit den Temperaturen der Außenluft, der Kanalatmosphäre und der Kanalwand sowie der Luftfeuchtigkeit im Kanal verbunden. Im Sommer bewirkt die Zuführung warmer Außenluft in die Kanalatmosphäre tagsüber kein Trocknen vorhandenen Kondenswassers. Es kommt zu einer verstärkten Kondensatbildung aufgrund des unterschiedlichen Gehaltes an relativer Feuchte in der Außenluft und der Kanalatmosphäre /4/.

Erst die Nacht schafft vorteilhafte Belüftungsbedingungen, genau wie das im Winter der Fall ist, so daß also bei warmer Witterung, wenn die Voraussetzungen für Sulfidprobleme durch die erhöhte Stoffwechseltätigkeit der Bakterien ohnehin schon günstig sind, auch die Kondensatneubildung ihr Maximum erreicht. Die Kondensatbildung läßt sich beispielsweise durch Wärmedämmung der Kanalrohre einschränken. Allerdings liegen Erkenntnisse und Erfahrungen hierzu bislang nicht vor.

### 3.3.6 Die Druckrohrleitungen

Durch Untersuchungen von Wagner /20/ konnte nachgewiesen werden, daß sich in Druckleitungen schon nach kurzer Zeit bedeutend mehr Schwefelwasserstoff bildet als das in einem stehenden Abwasser nach wesentlich längerer Zeit der Fall war. Ferner konnte gezeigt werden, daß der Sulfatreduktion durch Bakterien eine größere Bedeutung für die Entstehung von Schwefelwasserstoff in Abwasseranlagen zukommt als der Eiweißzersetzung. Wagner führt die hohe  $H_2S$ -Bildung in Druckleitungen auf die besonders günstigen Entwicklungsmöglichkeiten

der sulfatreduzierenden Bakterien zurück, denen durch das vorbeiströmende Abwasser ständig Sulfate und gelöste organische Nahrungsmittel zugeführt und außerdem die für die Bakterien schädliche Abbauprodukte ausgewaschen werden. Hinzu kommt, daß in Druckleitungen, bedingt durch die Abwesenheit von Luft-sauerstoff, streng anaerobe Verhältnisse herrschen, die optimale Entwicklungsbedingungen für sulfatreduzierende Bakterien darstellen. Eine volllaufende Abwasserdruckleitung kann nach Wagner /21/ als Biofilmreaktor angesehen werden, bei dem die Schwefelwasserstoffbildung in einer bestimmten Zeiteinheit proportional zu der gesamten Oberfläche des Biofilms auf der Rohrrinnenwand ist.

Bei Untersuchungen von Lohse /1/ konnte gezeigt werden, daß die Temperatur, die Betriebsweise (kontinuierliche oder intermittierende Beschickung von Druckleitungen) sowie der Sulfatgehalt des Abwassers keinen Einfluß auf die Sulfatreduktion hat. Die Sielhautdicke korreliert hingegen gut mit der Sulfatreduktion, woraus gefolgert werden kann, daß die Desulfurikation sehr viel stärker in der Sielhaut und weniger im Abwasser abläuft.

### 3.3.7 Die Karbonatisierung von zementgebundenen Baustoffen

Als Karbonatisierung wird die Reaktion der im Baustoff enthaltenen Erdalkalitionen, insbesondere des Calciums, mit Kohlensäure bezeichnet. Am schnellsten schreitet sie bei relativen Luftfeuchten von 50% bis 70% fort. Unterhalb des Wasserspiegels ist bei fehlendem Kohlendioxid im Abwasser Karbonatisierung ebenso wenig möglich wie auf nassen (z.B. kondensierten) Oberflächen oberhalb des Abwasserspiegels.

Die Karbonatisierung des Zementsteins ist ein wesentlicher Schritt im Korrosionsmechanismus, da durch sie der pH-Wert, auf ein für Thiobacillen tolerierbares Maß, abgesenkt wird. Bei der Herstellung von Beton oder Asbestzement liegt der pH-Wert in wässrigen Lösungen auf den Oberflächen von zementgebundenen Baustoffen bei ca. 12,5. Durch die Karbonatisierung sinkt er bei Beton auf rund 8,5 und bei Klinker auf 6 bis 7.

Die im Vergleich zur Außenluft höheren Kohlendioxidgehalte (bis 0,1 Vol.-%; vgl. Kap 3.3.4) in der Kanalatmosphäre begünstigen die Karbonatisierung; andererseits wird sie durch den hohen Feuchtegehalt der Kanalatmosphäre - bis

ca. 95% relativer Luftfeuchte - behindert. Gleichungen zur Abschätzung der Karbonatisierungstiefe, wie sie für atmosphärische Verhältnisse Gültigkeit haben, lassen sich daher nur bedingt auf die Verhältnisse im Kanal übertragen /4/.

### 3.4 Schwefelsäurebildung durch Thiobacillen

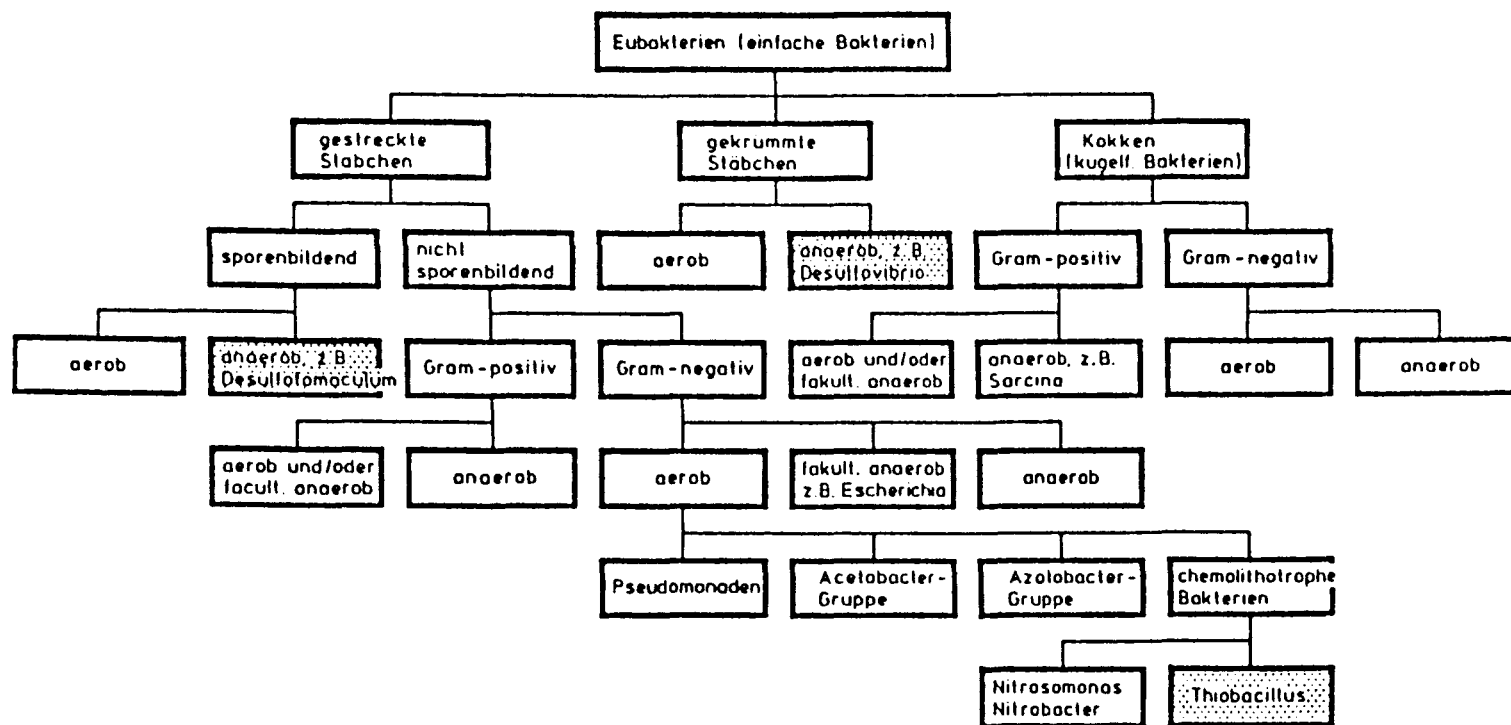
In Gegenwart flüchtiger Schwefelverbindungen in der Kanalatmosphäre wird auf der Kanalwand oberhalb des Abwasserspiegels nachgewiesenermaßen Schwefelsäure von Thiobacillen gebildet /4;5;10;16/. Thiobacillen sind eine Gruppe Gram-negativer, nicht sporenbildender Bakterien, die äußerst säureresistent sind und Schwefelsäurekonzentrationen von über 20% widerstehen können. Bei Untersuchungen von Pomeroy /12/ wurden Schwefelsäurekonzentrationen bis zu 7% in Kondenswassertröpfchen in Abwasseranlagen gefunden.

Die systematische Einordnung der Thiobacillen in das Reich der Bakterien ist Abb. 3.8, ihre wichtigsten Vertreter sind Tab. 3.1 zu entnehmen. Thiobacillen gehören im Boden zur autochthonen Flora und gelangen mit dem Boden ins Abwasser. Mit Aerosolen und Spritzwasser gelangen sie in die Kanalatmosphäre und von dort auf die Kanalwand, wo sie sich unter günstigen Bedingungen stark vermehren können.

Thiobacillen sind zur Energiegewinnung durch Oxidation reduzierter anorganischer Schwefelverbindungen befähigt. Die meisten von ihnen können verschiedene Schwefelverbindungen wie z.B. molekularen Schwefel, Thiosulfat und Sulfid oxidieren, wobei als Endprodukt Sulfat entsteht. Die Oxidation vollzieht sich in mehreren Schritten, deren Zwischenprodukte und -stufen noch nicht alle vollständig bekannt sind.

Bis vor kurzem nahm man an, daß Schwefelwasserstoff von Thiobacillen nicht direkt als Substrat genommen wurde. Man vertrat vielmehr die Meinung, daß  $H_2S$  in Gegenwart des Sauerstoffs der Kanalatmosphäre nicht beständig sei und chemisch zu elementarem Schwefel oxidiert würde. Der elementare Schwefel würde sich an der Kanalwand niederschlagen und dann den Thiobacillen als Substrat dienen /1;4/.

Abb. 3.8 Klassifizierende Einordnung der Thiobacillen in Anlehnung an Schlegel /6/.





Tab. 3.1 Arten von Thiobacillen /1/

Nr.	Art	Substrat	pH-Bereich	pH-Optimum	Temperatur-Optimum °C	Ernährungstyp	Aerobilität	beweglich	Vorkommen im Kanal	Bemerkungen
1	<i>T. denitrificans</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{2-}$ , $S_3O_6$ , $S_4O_6$ , $S_5O_6$ , $SCN^-$	6-8	7		obligat autotroph	aerob, fakultativ anaerob	ja	ja	reduziert $NO_3^-$ zu $N_2$ nur im anaeroben Milieu
2	<i>T. ferrooxidans</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $Fe^{2+}$ , $S^0$	2-6	2,0-5,0	15-20	fakultativ autotroph	aerob	ja	nein	oxidiert $Fe^{2+}$ zu $Fe^{3+}$
3	<i>T. intermedius</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $S^0$ , Glutamat	2-9	6,0-7,0	30	fakultativ autotroph	aerob	ja	ja	bei gleichzeitigem Angebot von $S_2O_3^{2-}$ u. org. Material werden beide gleichermaßen angenommen Nuclearplasma enthält Carboxysomen
4	<i>T. neapolitanus</i> (= <i>Thiobacillus</i> X)	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{2-}$ , $S^0$	3-13	6,2-7,0	28	autotroph	aerob	ja	ja	Intrazelluläre Schwefel-einschlüsse
5	<i>T. novellus</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{0-}$ , Glutamat	2-9	7,8-9,0	30	fakultativ autotroph	aerob	nein	ja	gehemmte Oxidation von $S_2O_3^{2-}$ bei gleichzeitigem Angebot von org. Material, keine Carboxysomen
6	<i>T. perometabolis</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{2-}$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$		2,6-6,0	30	fakultativ autotroph	aerob	ja	nein	Wachstumsmaximum bei gleichzeitigem Angebot von $S_2O_3^{2-}$
7	<i>T. thiooxidans</i> (= <i>T. concretivorus</i> )	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{2-}$ , $S^0$	0,5-6	2,0-3,5	28-30	obligat autotroph	aerob	ja	ja	gehemmt durch $NO_3^-$
8	<i>T. thioparus</i>	$S_2O_3^{2-}$ , $S^{2-}$ , $S^0$ , $S_4O_6^{2-}$ , $SCN^-$	4,5-9	6,6-7,2	28	obligat autotroph	aerob, einige Stämme fakult. anaerob	ja	ja	große intrazelluläre Speicherung element. Schwefels.; st.; einige Stämme reduzieren $NO_3^-$ zu $N_2$ im anaeroben Milieu

Neuere Untersuchungen am Hamburger Sammlersystem von 1987 haben jedoch gezeigt, daß  $H_2S$  direkt von den Thiobacillen veratmet wird, wobei es anfänglich zur Ausscheidung von elementarem Schwefel kommt, der dann zu Schwefelsäure oxidiert wird. Eine Autoxidation des Schwefelwasserstoffs zu elementarem Schwefel dürfte wenig wahrscheinlich sein, zumal die Geschwindigkeit der biologischen Oxidation etwa  $10^8$  mal höher ist, als die der chemischen /5/. Andere essentiell benötigte Stoffe wie Phosphor, Calcium, Magnesium etc. sind in ausreichender Menge im Zementstein bzw. in den Korrosionsprodukten enthalten. Die für die Stoffwechselprozesse notwendige relative Feuchte von mindestens 75% kann aus der Kanalatmosphäre, aus dem Kondenswasser, aus Kapillarwasser oder aus eindiffundiertem Grundwasser stammen /4/.

Die Besiedlung der Kanalwand mit Thiobacillen erfolgt in Abhängigkeit vom pH-Wert der Baustoffoberflächen. Voraussetzung für die Ansiedlung von Thiobacillen auf zementgebundenen Baustoffen ist, daß der pH-Wert zunächst bis auf ein für Thiobacillen tolerierbares Maß von ca. pH 8 abgesenkt wird. Dies geschieht in der Regel durch Karbonatisierung, Bewuchs mit Sichelhaut und leicht saurem Einfluß aus Schwefelwasserstoffwasser. Zuerst siedeln sich schwach acidophile Arten *T. novellus*, *T. intermedius* und *T. neapolitanus* an. Als Stoffwechselprodukte scheiden sie Schwefelsäure aus, wodurch der pH-Wert auf der Baustoffoberfläche unter pH 6 absinkt. Geeignete Voraussetzungen für die Ansiedlung von *T. thiooxidans* sind damit geschaffen. In anderen Quellen wird *T. thiooxidans* auch als *T. concretivorus* bezeichnet. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß diese Bakterienarten identisch sind /5/.

Durch die Tätigkeit von *T. thiooxidans* kann der pH-Wert weiter bis unter pH 0,5 fallen, bei dem andere Mikroorganismen, das gilt auch für die restlichen Vertreter der Thiobacillus-Gruppe, gehemmt bzw. ausgeschaltet werden. Eine übliche Gasraumsichelhaut ist dann nicht mehr vorzufinden.

Parker hat die Reihenfolge der biochemischen und chemischen Vorgänge, die eine fortschreitende Verminderung des pH-Wertes zur Folge haben, näher untersucht und beschrieben (Abb. 3.9) /16/. Der pH-Wert auf der Baustoffoberfläche und die Anzahl der einzelnen Thiobacillenarten korrelieren gut miteinander. Bei ungeschützten Rohren aus Beton oder Asbestzement ergibt sich eine Abhängigkeit zum Korrosionsgrad. An stark korrodierten Stellen wurden bis zu  $2 \cdot 10^8$  Zellen *T. thiooxidans* pro mg Protein gefunden, wohingegen an Stellen ohne sichtbare Korrosion keine *T. thiooxidans* nachgewiesen werden konnten. *T. thi-*



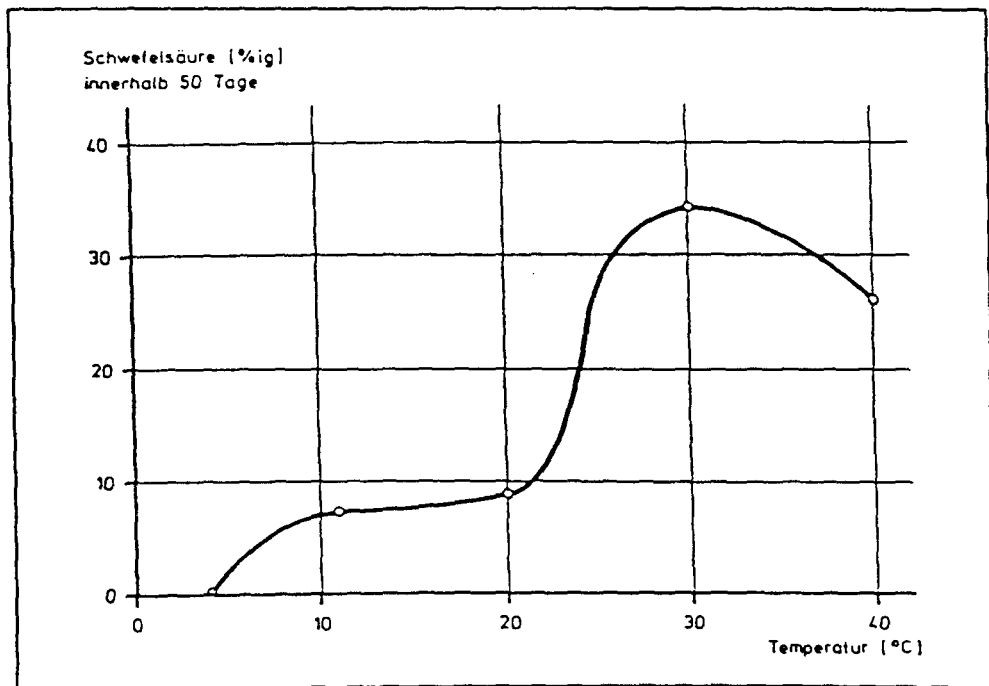


Abb. 3.10 Schwefelsäureproduktion auf der Kanalwand von *T. thiooxidans* in Abhängigkeit von der Temperatur /16/

### 3.5 Die Korrosion und typische Schadensbilder zementgebundener Baustoffe

Zu den im Kanalbau verwendeten zementgebundenen Baustoffen zählen Beton, Asbestzement und Mauermörtel. Wie schon erwähnt, vollzieht sich die BSK in Abwasseranlagen nur oberhalb des Abwasserspiegels, wo an feuchten Flächen der Schwefelwasserstoff durch *T. thiooxidans* zu Schwefelsäure oxidiert wird. Diese Thiobacillen sind in der Lage, Schwefelsäure bis zu einer Konzentration von etwa 7% zu erzeugen, was einem pH-Wert von 0,1 entspricht. In der Literatur werden zwar vereinzelt auch höhere Säurekonzentrationen angegeben (bis zu 25%), doch dürften sich diese nur aufgrund von Verdunstungserscheinungen ergeben /12;17/.

Beton besteht im wesentlichen aus Zuschlägen und Zementstein, der aus Zement und Wasser durch Hydratation entsteht. Die Eigenschaften des Zementsteins werden durch den verwendeten Zement, den W/Z-Wert und den zeit- und temperaturabhängigen Hydratationsgrad bestimmt. Der Zementstein besteht aus den so-

genannten Hydratphasen; im wesentlichen aus Calciumsilicathydraten, in geringerem Umfang aus Calciumaluminathydrat und Calciumferrithydrat, sowie aus Calciumhydroxidlösung. Im Zementstein sind Poren mit wässriger Calciumhydroxidlösung enthalten, die stark alkalisch reagiert. Als Zuschläge werden Sande und Kiese aus quarzitischen oder kalksteinhaltigen Materialien verwendet. Ein ähnliches Verhalten wie Beton weist Asbestzement auf, bei dem Asbestfasern in der Zementsteinmatrix eingeschlossen sind.

Mit den alkalischen Bestandteilen des Zementsteins und gegebenenfalls der Zuschläge bildet die Schwefelsäure leicht lösliche Salze, die von der Rohrwand vom Kondenswasser oder von steigenden Wasserständen abgewaschen werden können (Säureangriff). Die Schwefelsäure reagiert dabei nicht nur mit dem Kalk des Zementsteins, sondern auch mit Aluminium-, Eisen- und Magnesiumverbindungen unter Bildung wasserlöslicher Produkte (Sulfate). Da es sich bei der BSK im Endeffekt um einen reinen Säureangriff handelt und Zemente nicht säurebeständig sind, verhalten sich die gebräuchlichen Zemente praktisch gleich /18/.

Mit dem allmählich fortschreitenden Abtrag von Rohrmaterial nimmt Beton mit quarzitischen Zuschlägen ein charakteristisches Schadensbild an ("Waschbetonstruktur"; Abb. 3.11, Abb. 3.12). Bei Beton mit kalkhaltigen Zuschlägen erfolgt der Abtrag eher flächenhaft, während bei Asbestzementbauteilen an der Oberfläche die Asbestfasern zurückbleiben und ein starkes Aufquellen der Kanalwand festzustellen ist.

Im Anfangsstadium der Korrosion kann neben dem Säureangriff auch ein Sulfatangriff beobachtet werden. Die in der Schwefelsäure enthaltenen Sulfationen bilden mit den calcium- und aluminathaltigen Bestandteilen des Zementsteins schwerlösliche, wasserreiche, voluminöse Kristalle (z.B. Ettringit = Tricalciumsulfoaluminat). Die Volumenvergrößerung bei der Bildung von Ettringit beträgt maximal 227%, wenn das Reaktionsprodukt 32 Wassermoleküle enthält (Reaktion 5 in Tab. 3.2). Der Kristallisationsdruck verursacht das Sulfatreiben; verbunden mit abnehmender Festigkeit stellen sich Risse ein, wodurch der Zementstein zerfällt.

Bei starkem Säureangriff erfolgt der Abtrag wahrscheinlich so schnell, daß kein Sulfatangriff erkennbar ist, und somit der Säureangriff allein den Korrosionsverlauf bestimmt /5/. Da nur dem Sulfatreiben durch die Verwendung hochsulfatwiderstandsfähiger Spezialzemente wirkungsvoll begegnet werden

kann, reichen solche Schutzmaßnahmen allein nicht aus, um die Sicherheit gegen BSK zu gewährleisten. Hierzu bedarf es anderer Methoden, die in Kapitel 5 behandelt werden.

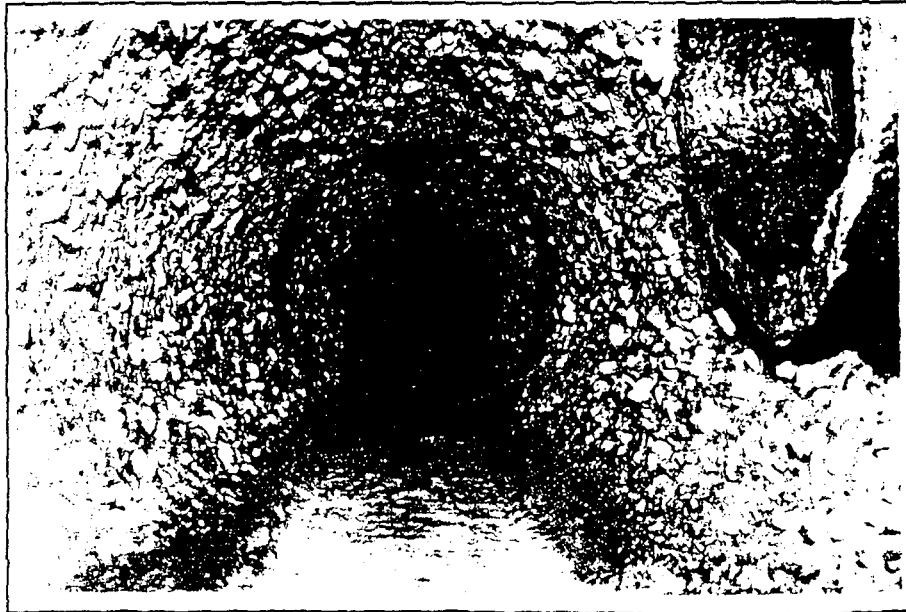


Abb. 3.11 BSK in einem Mischwasserkanal mit geringem Trockenwetterabfluß /19/

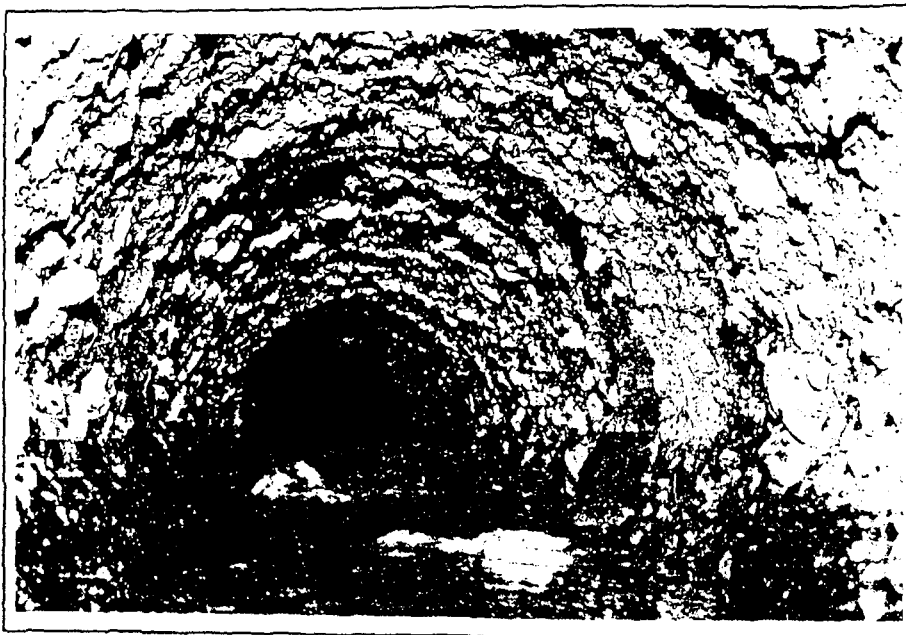


Abb. 3.12 BSK oberhalb des Abwasserspiegels in einem Schmutzwasserkanal /19/

Über die genauen Reaktionsabläufe im Zementstein liegen nur wenig Kenntnisse vor. Einige mögliche Reaktionen sind in Tabelle 3.2 zusammengefaßt. Selbst bei der Gipsbildung sind geringe Treiberscheinungen zu verzeichnen. Für Korrosionsprodukte ist ein hoher Gipsanteil ( $\text{CaSO}_4$ ) in der Trockenmasse typisch.

Tab. 3.2 Korrosionsreaktionen calciumhaltiger Baustoffe /1/

Reaktion Nr.	Lit. Nr.	Ausgangsprodukte	Endprodukte
1	(3)	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
2	(2)	$\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{CO}_3$
3	(3)	$3 \text{CaO} \cdot 2 \text{SiO}_2 + n \text{H}_2\text{O} + 3 \text{SO}_4^{2-}$	$3 \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{SiO}_2 + (n-2) \text{H}_2\text{O}$
4	(4)	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 4 \text{H}_2\text{SO}_4 + 26 \text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$
5	(1)	$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + n \text{H}_2\text{O} + 3 \text{CaSO}_4$	$3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$
		n = 10 bis 32	

Bei geringer Schwefelsäurebildung steht die gesamte Säure für die Reaktion mit dem Baustoff zur Verfügung. Dagegen kann bei hoher Bildungsrate nicht die gesamte Säure durch die pastöse Korrosionsproduktschicht dringen, so daß ein Teil der Säure vom Kondenswasser verdünnt wird und ins Abwasser gelangt. Bei starker Kondenswasserbildung an sehr nassen Wänden gelangen ca. 50% der Säure, ohne mit dem Baustoff zu reagieren, ins Abwasser. Durch das Abfließen des Kondenswassers kommt es zu entsprechenden Korrosionsbildern an den Rohren. Vor allem bei Betonrohren ist zu beobachten, daß unzureichende (nicht porenfreie) Schutzanstriche zu stärkeren Schäden führen können, als das bei ungeschützten Rohren der Fall wäre /12/.

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist auch abhängig von der Nutzungsart der Abwasserkanäle. In Mischwasserkanälen, bei denen Regenereignisse zu einer zeitweiligen Vollfüllung des Kanals führen, wird der von der Schwefelsäure zerstörte Zementstein weggespült. Die Korrosion setzt sich schnell fort, da die sich weiterhin bildende Schwefelsäure in einer entsprechenden Tiefe mit bis dahin noch nicht angegriffenem Zementstein reagieren kann. In Schmutzwasserkanälen, wo im Abwasserabfluß nur geringfügige tageszeitliche Schwankungen auftreten, ergeben sich die sichtbar stärksten Schäden im Bereich der Abwasserwechselzone.

Einen weiteren Einfluß auf die Korrosionsgeschwindigkeit haben auch die Zuschlagarten des Betons. Bei Betonen mit quarzitischen Zuschlägen kann nur der Zementstein mit der Schwefelsäure reagieren, während bei Betonen mit Kalkstein als Zuschlagstoff der Zementstein und der Zuschlagstoff selber reagieren. Obwohl es sich bei Kalkstein um einen säurelöslichen Zuschlagstoff handelt, ist aus den oben genannten Gründen, eine drei- bis fünffach höhere Lebensdauer zu beobachten /5/. Dieser Vorteil ergibt sich allerdings nur bei Angriffen von Schwefelsäure. Bei Angriffen durch Säuren, die mit dem Kalkstein leicht wasserlösliche Korrosionsprodukte bilden, wie z.B. bei Salzsäure, Kohlensäure oder organischen Säuren, erfolgt ein wesentlich stärkerer Angriff, als bei einem mit quarzitischen Zuschlägen hergestellten Beton /18/.

Erfahrungsgemäß ist in allen Kanälen die Korrosion im Abwasserwechselbereich besonders ausgeprägt. Dies liegt, wie bereits erwähnt, zum einen an der guten Versorgung der Bakterien mit Substrat und zum anderen daran, daß die Korrosionsprodukte ständig entfernt werden und die Säure ungehindert an den Baustoff gelangen kann. Die maximalen Abtragsraten bei Betonrohren liegen bei ca. 4 mm bis 6 mm pro Jahr /4/. Neben der Reaktion von Schwefelsäure mit dem Baustoff können auch chemische Umsetzungen mit Schwefelwasserstoff stattfinden, die für die Korrosion allerdings von untergeordneter Bedeutung sind und daher auch nicht näher behandelt werden.

Die Unterteilung und Beurteilung chemischer Angriffe auf Beton erfolgt i.a. gem. DIN 4030 /22/. Obwohl die gültigen Normen DIN 4032 /22/ bzw. DIN 4035 /22/ diese Vorgehensweise auch für Abwasserrohre aus Beton vorsehen, hat sich im Rahmen des Hamburger Forschungsvorhabens eine Anwendung von DIN 4030 hinsichtlich der BSK als ungeeignet erwiesen /5/. Aufgrund der in Hamburg gemachten Erfahrungen erscheint es in diesem Fall sinnvoller, den Angriffsgrad der BSK in Abhängigkeit der miteinander korrespondierenden Größen wie des pH-Wertes im Kondenswassertropfen an der Kanalwand, der Sulfidkonzentration in der Kanalatmosphäre und der vorhandenen Anzahl der Thiobacillen in der Sielhaut zu definieren. Ein Vorschlag zur Klassifizierung ist der Tabelle 3.3 zu entnehmen.



Tab. 3.3 Klassifizierung des Angriffsgrads der BSK in Abwasserkanälen aus Beton ohne Schutzmaßnahmen /5/

pH-Wert im Kondenswassertropfen an der Kanalwandung	S <sub>2</sub> -Im freien Überschnitt vorhandene bzw. zu erwartende Sulfid-Konzentration (H <sub>2</sub> S) in ppm	Zellzahlen *)	Angriffsgrad der Korrosion **)	Abtrag der Betonoberfläche pro Jahr ***)	Sanierungsmaßnahmen erforderl. nach Jahren ****)	Bemerkungen
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold; margin-right: 5px;">             basisch neutral sauer           </div> <div style="text-align: center;">             14 13,0 12 11 10 9 8,5 8 7 6,0 5 3,5 3 2 1           </div> </div>						nicht carbonatisierter Beton
		0 - 10 <sup>2</sup>	schwach	absendend	> 80	carbonatisierter Beton
	< 0,5	10 <sup>3</sup> - 10 <sup>5</sup>	mittel	≤ 0,5 mm	> 40	
	> 0,5	10 <sup>6</sup> - 10 <sup>8</sup>	stark	> 0,5 mm	> 5	

\*) Die Zellzahlen beziehen sich auf T. thiooxidans und geben die Anzahl der Zellen pro 1 mg Protein an der Kanalwandung an.

\*\*) Die hier gewählte Beurteilung des Angriffsgrades stimmt nicht mit der DIN 4030 überein.

\*\*\*) Die Angaben sind geschätzt und beruhen zum Teil auf Erfahrungen und zum Teil auf Laboruntersuchungen.

\*\*\*\*) Die Angaben sind geschätzt und beruhen auf Erfahrungen.

### 3.5.1 Asbestzement als Bindemittel für Abwasserkanalrohre

Asbestzement besteht zu 10% bis 15% seines Trockengewichts aus feinsten Asbestfasern und zu 85% bis 90% aus Normzement, i.a.. Portlandzement. Der Wasserzementwert liegt nicht über 0,2. Die Asbestzementrohre (DIN 19800 und DIN 19850) werden für Druck- und Freispiegelleitungen eingesetzt und zeichnen sich durch hohe Zugfestigkeit, relativ geringes Gewicht und recht gute chemische Beständigkeit aus; preislich konkurrieren sie mit Betonrohren.

Gegenüber Betonrohren mit quarzitischen Zuschlägen ergibt sich aufgrund des hochverdichteten Feinschichtenaufbaus, des hohen Zementgehalts und der glatten Oberfläche ein höherer Korrosionswiderstand. Dieser Vorteil wird allerdings durch die Dünnwandigkeit der Rohre wieder aufgehoben. Durch Untersuchungen von Eick et al. /23/ wurde gezeigt, daß der Korrosionswiderstand mit dem Alter der Rohre ansteigt. Bei starkem Säureangriff (vgl. Tab 3.3) ist Asbestzement als Material für Abwasserrohre nicht mehr geeignet. Bezüglich treibender Korrosion sind Sulfatkonzentrationen bis 500 mg/l bei 8% bis 10% C<sub>3</sub>A-Gehalt (Tricalciumaluminat) im Portlandzement unschädlich. Das Verhalten der Asbestzementrohre, bezüglich des Korrosionsmechanismus, entspricht dem

von Betonrohren (vgl. Kap 3.5). Hinsichtlich der Korrosionsschutzmaßnahmen von Asbestzementrohren schreibt DIN 19850 /22/, Teil 1, Abs. 5.10 vor:

"Rohre und Formstücke, die Kontakt mit angreifenden Wässern, Böden oder Gasen haben, müssen so hergestellt oder geschützt werden, daß sie deren Angriff widerstehen. Rohre und Formstücke sind bei der Verwendung als Misch- und Schmutzwasserkanäle mit einem inneren Rohrschutz zu versehen. Bei Regenwasserkanälen ist nur in Sonderfällen ein innerer Rohrschutz notwendig".

### 3.6 Zusammenfassung

Für das Auftreten von BSK sind eine Reihe von Faktoren Voraussetzung. Eine wesentliche Voraussetzung stellt das mit organischen und anorganischen Stoffen verunreinigte Abwasser dar. Sie dienen den im Abwasser und in der submersen Sielhaut lebenden Mikroorganismen als Nährstoff. Unter anderem entstehen beim Abbau dieser Stoffe flüchtige Schwefelverbindungen, die in das Abwasser diffundieren und von dort, sofern sie nicht oxidiert werden können, über die Kanalatmosphäre an die Baustoffoberfläche gelangen. Insbesondere die Desulfurikation ist in engem Zusammenhang mit dem Sauerstoffhaushalt und der Temperatur des Abwassers zu sehen. Der gebildete Schwefelwasserstoff ist ein geeignetes Substrat für Thiobacillen, die bei geeignetem pH-Wert auf der Baustoffoberfläche in Gegenwart von ausreichender Feuchtigkeit Schwefelsäure produzieren. Vor allem *T. thiooxidans* ist sehr säureresistent und kann als Leitorganismus zur Beurteilung des Angriffsgrades auf zementgebundene Abwasserrohre herangezogen werden.

Gemäß folgendem Risikokatalog ist die Möglichkeit der Entstehung von Sulfidproblemen besonders in Betracht zu ziehen:

- Druckleitungsmündungen
- turbulente Freigefälleleitungen mit sulfidhaltigen Abwässern
- Sohlablagerungen
- lange Freigefälleleitungen mit geringen Fließgeschwindigkeiten Freispiegelleitungen mit geringen Teilfüllungen
- erhöhte Abwassertemperaturen
- Leitungsbereiche ohne Abwasserbewegung
- leicht faulfähige Abwasserinhaltsstoffen

- Abwassereinleitung von Grundstückskläranlagen
- Einleitung gewerblicher oder industrieller Abwässer mit der reduzierten Schwefelverbindungen oder niedrigem pH-Wert

Zementgebundene Rohrwerkstoffe werden lösend (Schwefelsäurekorrosion) und treibend (Sulfatkorrosion) angegriffen. Bei starkem Säureangriff erfolgt der Abtrag allerdings so schnell, daß kein Sulfatangriff erkennbar ist, und somit der Säureangriff allein den Korrosionsverlauf bestimmt. Der Einfluß der Betonzuschlagstoffe wird in der Literatur unterschiedlich beurteilt, allerdings versprechen Zuschläge aus Kalkstein geringe Vorteile gegenüber quarzitisches Zuschlägen.

Als typisches Schadensbild stellt sich bei Beton eine waschbetonartige Struktur an der Baustoffoberfläche ein, während beim Asbestzement ein starkes Aufquellen des Materials beobachtet werden kann. Generell zeigen Rohre aus Asbestzement einen höheren Korrosionswiderstand gegenüber Betonrohren, allerdings wird dieser Vorteil durch die Dünnwandigkeit der Rohre wieder aufgehoben. Die maximalen Zerstörungsgraten von zementgebundenen Abwasserrohren liegen bei 4 mm bis 6 mm pro Jahr.

## 4. SCHADENSANALYSE

### 4.1 Einleitung

Im Juni 1991 wurden vom Abwasserverband (AWV) Weddel/Lehre bei routinemäßigen Kanalkontrollen im Schmutzwassernetz von Braunschweig/Volkmarode erhebliche Korrosionsschäden an Asbestzementrohren festgestellt. Aufgrund der Schwere und Ausdehnung der Schäden, die zum Teil auch in den Schächten zu erkennen sind (Bild 4.1), sah man sich veranlaßt, die Korrosionsschäden genauer zu untersuchen. Ein Teilstück eines geschädigten Asbestzementrohres wurde im November 1991 ausgebaut und durch ein neues ersetzt. Das korrodierte Rohr wurde dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der TU Braunschweig übergeben, damit geeignete Untersuchungen am Objekt vorgenommen werden konnten. In diesem Kapitel wird eine Schadensanalyse mit dem Ziel durchgeführt, gesicherte Aussagen hinsichtlich Schadensumfang, -ursache, -entstehung und Resttragfähigkeit zu erhalten.



Abb. 4.1 Blick von einem Schacht aus in ein Rohr während des Betriebes

## 4.2 Ausbau und Bestandsaufnahme

Der zu untersuchende Rohrabschnitt wurde in Anwesenheit von Mitarbeitern des IBMB und des IGB der TU Braunschweig am 06.11.1991 aus der Kanalhaltung im Kirchweg, BS-Volkmarode, zwischen den Schächten Nr. 31 und 32 ausgebaut und durch ein neues Rohr ersetzt (Abb. 4.2, s.a. Anhang Abb. 1).



Abb. 4.2 Rohr während der Bergung

Nachfolgend werden die wichtigsten Einbauparameter der untersuchten Haltung bzw. des untersuchten Rohrstückes wiedergegeben:

- Haltungslänge  $l = 50,6 \text{ m}$
- Leitungsgefälle  $I = 1:44$
- Abwasservolumen  $Q \approx 130 \text{ l/s}$

- Abflußquerschnitt  $d = 300 \text{ mm}$
- Abflußgeschwindigkeit  $v \approx 1,81 \text{ m/s}$
- Einbautiefe in Mittel  $t = 1,30 \text{ m}$
- Baustoff Asbestzement
- Betriebsweise Freispiegelleitung
- Abwasserart Schmutzwasser
- Einleiter vorwiegend häusliche Einleitungen
- Lage oberhalb des Grundwasserspiegels

Der Haltung ist eine Druckrohrleitung vorgeschaltet, die Abwässer des Stadtteils BS-Schäpen zur Kläranlage BS-Dibbesdorf leitet. Auch die Abwässer, die aus Richtung BS-Schäpen kommen, sind überwiegend häuslichen Ursprungs. Laut Angaben des AWV Weddel/Lehre handelt es sich bei dem zu untersuchenden Kanalrohrabschnitt um ein

Asbestzement-Druckrohr 300 x 5000 - ND6 - DIN 19800  
mit Kreisquerschnitt und folgenden Sollwerten nach DIN 19800, Blatt 1 /22/:

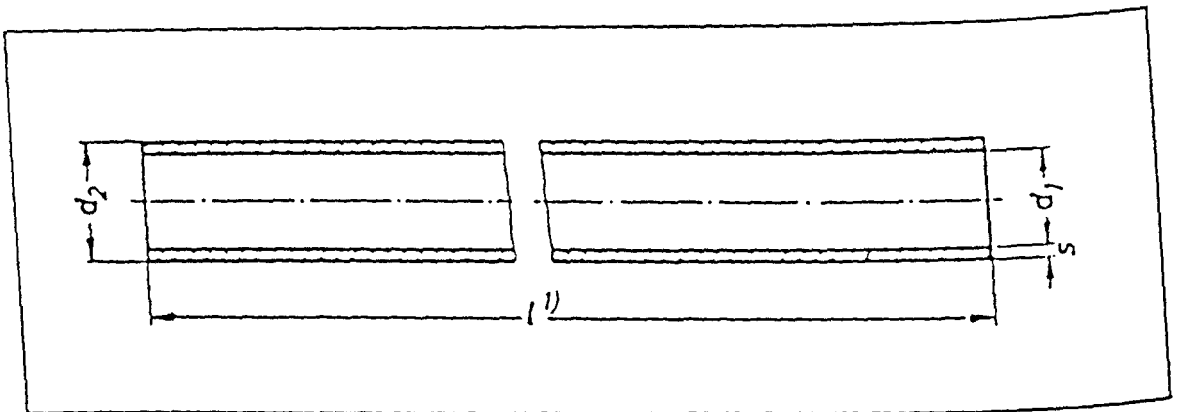


Abb. 4.3 Maße eines kreisförmigen Asbestzementrohres nach DIN 19800, Blatt 1

- Außendurchmesser  $d_2 = 334 \text{ mm}$
- Innendurchmesser  $d_1 = 300 \text{ mm}$
- Wanddicke  $s = 17 \text{ mm}$
- Einbaulänge  $l = 5000 \text{ mm}$
- Nenndruck ND = 6 bar

An dem ausgebauten Rohr wurde eine Aufweichung und teilweise eine Abrasion in den Ulmen (Abb. 4.4 und 4.5) und eine leichte Ovalität festgestellt (Abb. 4.6 und 4.7). Die Maße wurden wie folgt ermittelt:





Abb. 4.4 Aufweichung an den Ulmen



Abb. 4.5 Abrasion in der Wasserwechselzone an den Ulmen



Abb. 4.6 Außendurchmesser in der Horizontalen hier ca. 34,5 cm



Abb. 4.7 Außendurchmesser in der Vertikalen hier ca. 34 cm



An dem ausgebauten Kanalrohr wurden die entsprechenden Maße wie folgt ermittelt:

- vorh. Außendurchmesser  $d_2 = 340 \text{ mm bis } 345 \text{ mm}$
- vorh. Innendurchmesser  $d_1 = 300 \text{ mm bis } 310 \text{ mm}$
- vorh. nicht korrodierte Wanddicke im Bereich der Kanalsohle  $s = 18 \text{ mm}$
- vorh. nicht korrodierte Wanddicke im Bereich der Abwasserwechselzone  
 $s = 3 \text{ mm} - 8 \text{ mm}$  (Mittelwert  $5 \text{ mm}$  für  $n = 8$ )
- vorh. nicht korrodierte Wanddicke im Bereich des Rohrscheitels  
 $s = 18 \text{ mm} - 16 \text{ mm}$  (Mittelwert  $17 \text{ mm}$  für  $n = 8$ )

Die Rohraußenwand war mit einem Schutzanstrich aus Bitumen versehen worden. Auf der Rohrrinnenwand konnte kein Schutzanstrich festgestellt werden, obwohl DIN 19830 /22/, Abschnitt 3.1 (1978) dies bereits ausdrücklich für Freispiegelleitungen vorschreibt. Da auf Anfrage beim AWV Weddel/Lehre keine Angaben über den Zeitpunkt der Bauplanung und des Verlegezeitraumes gemacht werden konnten, kann über den Nutzungszeitraum der Leitung nur spekuliert werden. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich zu sagen, welche Norm zum Zeitpunkt der Bauplanung Gültigkeit hatte. Angaben über die Bemessung des Asbestzementrohres und über die in der statischen Berechnung nachgewiesene Rohrvergleichsspannung liegen nicht vor. Aggressive Einwirkungen aus dem anstehenden Boden oder Grundwasser sind auszuschließen.

#### 4.3 Schadensbeschreibung

Am 10.06.1991 ist die gesamte Abwasserleitung im Bereich Schapenstraße und Kirchweg in BS-Volkmarode mit einer speziellen Kanal-Video-Anlage untersucht worden. Dabei sind insbesondere starke Korrosionsschäden in Kanalhaltungen aus Asbestzementrohren beobachtet worden. Die Schäden sind in einem Schadensprotokoll und auf Videobändern dokumentiert. In Haltungen, in denen Steinzeug als Rohrmaterial zum Einsatz gelangte, sind keine Korrosionsschäden festzustellen.

Nach dem Ausbau eines Teilstückes des korrodierten Asbestzementrohres ergab sich folgendes Bild (Abb. 4.8, Abb. 4.9):



Abb. 4.8 Korrodiertes Asbestzementrohr



Abb. 4.9 Korrodiertes Asbestzementrohr

1. Starke Ab- und Auflösungen des Rohrmaterials im Bereich der Abwasserwechselzone.
2. Das korrodierte Material besitzt eine bräunliche bis gelbe Färbung.
3. Die Korrosionsprodukte weisen nur noch einen losen Verbund untereinander auf und lassen sich ohne Schwierigkeiten leicht entfernen.
4. Der gesamte Rohrquerschnitt ist mit einem dünnen schmierigen Belag überzogen.
5. Im Bereich des Rohrscheitels sind hellgraue bis weiße Ausblühungen festzustellen.
6. Im Bereich der Kanalsohle konnten keine Korrosionsschäden festgestellt werden. Die Farbe der Sohle ist dunkelgrau bis schwarz.
7. Verformungen des Rohrquerschnitts: Außendurchmesser horizontal = 345 mm; Außendurchmesser vertikal = 340 mm.
8. Schäden an der Außenwand sind nicht festzustellen.
9. An der Sägefläche der Leitungsproben war zu erkennen, daß das nicht korrodierte Asbestzement-Material ein dichtes Gefüge aufwies.
10. Die Korrosionsschäden sind in allen Rohrleitungen aus Asbestzement, die der Druckrohrleitung nachgeschaltet sind, in gleichem Umfang zu beobachten.
11. Sohlablagerungen konnten nicht beobachtet werden.

#### 4.4 Bodenmechanische Untersuchungen

Um die Einbettungsbedingungen des Rohres zu ermitteln und zu überprüfen, ob hieraus evtl. mechanische Schadensursachen abzuleiten sind, wurden während des Ausbaus vom IGB Bodenproben zur bodenmechanischen Ansprache entnommen und im Labor untersucht.

Der das Rohr umgebende Boden besteht danach aus ausgeprägt plastischem, weichem Ton (Abb. 4.10) mit folgenden bodenmechanischen Kennwerten:

Wassergehalt  $w \approx 33\%$   
mittlere Feuchtdichte  $\rho = 1,90 \text{ g/cm}^3$   
Plastizitätszahl  $I_p = 0,42$   
Konsistenzzahl  $I_c = 0,675$   
Fließgrenze  $w_l = 0,62$   
Ausrollgrenze  $w_p = 0,20$

Proctordichte DIN 18 127  $\rho_p = 1,57 \text{ g/cm}^3$

Proctorwassergehalt  $w_p = 25 \%$  (Anhang Abb. 2)

Kompressionsversuch (Anhang Abb. 3)

Die Korngrößenverteilung ergab zwischen 50 bis 55% Tonanteil (Anhang Abb. 4).  
Die Scherfestigkeit wurde zu  $\Phi' = 19,2^\circ$  und  $c' = 23.5 \text{ kN/m}^2$  ermittelt.



Abb. 4.10 Lagerungsbedingungen des ausgebauten Rohres

## 4.5 Untersuchungen am Asbestzementrohr

### 4.5.1 Chemische Analyse

Die chemische Analyse der Korrosionsprodukte hat ergeben, daß der Kalk und die Kalksilikathydrate vollständig umgewandelt wurden und nicht mehr nachweisbar waren. Das Korrosionsmaterial enthielt ca. 35% Sulfit ( $\text{SO}_3$ ), was einem Gipsanteil von ca. 80% entspricht. Der pH-Wert eines wässrigen Auszugs der Probe betrug 2,5. Das korrodierte Material war vollständig mit Schwefelsäure getränkt.

Nitrate waren nur zu 0,006% in der Probe vorhanden. Eine Bildung von Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ; starke Säure) in großen Mengen durch nitrifizierende Bakterien ist damit ausgeschlossen.

Bei einer Untersuchung auf Karbonatisierung, mit dem Indikator Phenolphthalein, konnte nachgewiesen werden, daß das nicht korrodierte Material auch nicht karbonatisiert war. Die Karbonatisierungs- und Korrosionsfront entsprechen sich.

### 4.5.2 Scheiteldruckprüfung und Ringbiegezugfestigkeit

Um die Resttragfähigkeit der Asbestzementrohre beurteilen zu können, wurde eine Scheiteldruckprüfung in Anlehnung an DIN 19850 /22/ durchgeführt. Aus der sich dabei ergebenden Bruchlast  $F_u$  wurde dann die Ringbiegezugfestigkeit bestimmt. Für die Scheiteldruckprüfung wurde das Asbestzementrohr per Sägeschnitt in verschiedene Probekörper getrennt.

In einer ersten Versuchsreihe wurden drei ca. 300 mm lange Probekörper einer Prüfung unterzogen. Abweichend von der Norm, waren die Proben zum Zeitpunkt der Untersuchung lufttrocken! Die DIN 19850 /22/ schreibt eine Lagerung der Prüfkörper unter Wasser vor Versuchsbeginn von mindestens 48 Std. vor. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. Versuchsaufbau und ein typisches Reißbild eines Rohres nach Erreichen der Bruchlast  $F_u$  sind in den Abb. 4.8 und 4.9 dargestellt.



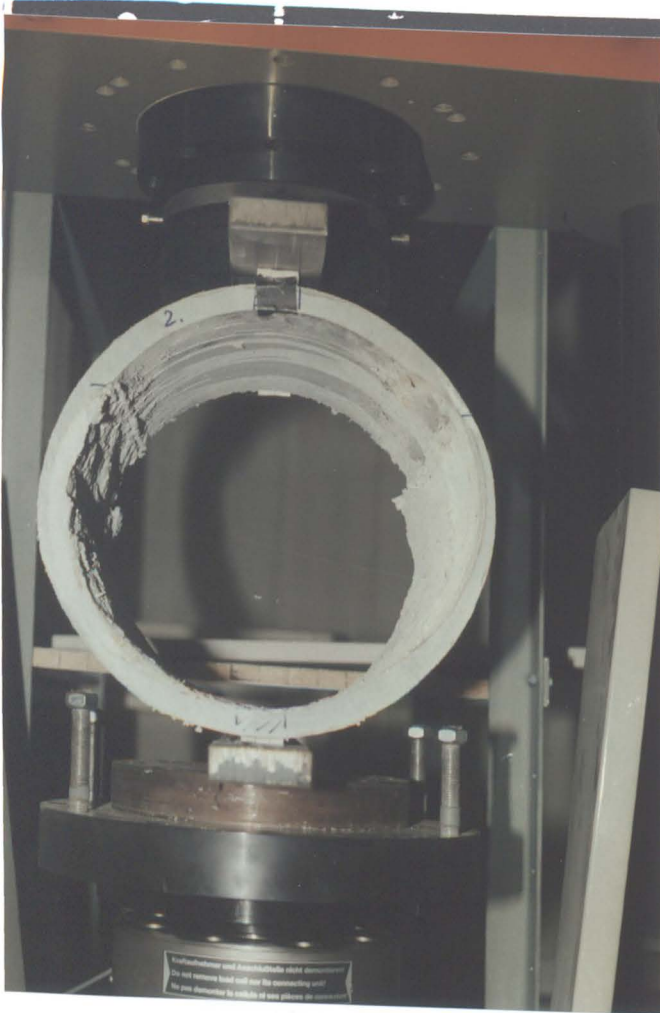


Abb. 4.8 Versuchsaufbau



Abb. 4.9 Ribbild nach der Scheiteldruckprüfung Erreichen der Bruchlast

Die Versuchsergebnisse sind in Tab 4.1 zusammengestellt:

Tab. 4.1 Versuchsergebnisse der Scheiteldruckprüfung bei Versuchsreihe I

	Bruchkraft	Bruchkraft	Probenlänge
	$F_u$ [kN]	$F_u$ [kN/m]	L [mm]
Probe 1	12,3	40,7	303
Probe 2	13,7	46,0	298
Probe 3	11,9	41,4	288

Die Ringbiegezugfestigkeit der Proben wurde nach DIN 19850, Teil 1, Abschnitt 6.3 wie folgt ermittelt:

$$\text{Gl. (4.1)}$$

$$\text{Gl. (4.2)}$$

$$\text{Gl. (4.3)}$$

$$\text{Gl. (4.4)}$$

Hierin bedeuten:

- $F$  Bruchkraft in [N]
- $l$  Länge des Probenstückes in [mm]
- $d$  der Innendurchmesser des Rohres in [mm]
- $s$  die Wanddicke des Probenstückes in [mm]
- $\alpha_k$  Korrekturfaktor bei Berücksichtigung des Spannungsverlaufs im gekrümmten Stab

Die berechneten Ringbiegezugfestigkeiten sind in Tab. 4.2 wiedergegeben:

Tab. 4.2 Ringbiegezugfestigkeiten Versuchsreihe I

	$\sigma_{rbz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Probe 1	37,3
Probe 2	42,1
Probe 3	37,9

Die zulässigen Mindestringbiegezugfestigkeiten für Asbestzementrohre betragen nach DIN 19850 /22/, Teil 1, Abschnitt 5.3 für Freispiegelleitungen 36 N/mm<sup>2</sup>. Für Asbestzement-Druckrohrleitungen mit einer Nennweite bis 400 mm und einem

Nenndruck von 6 bar betragen die Mindestringbiegezugfestigkeiten nach DIN 19800 /22/, Blatt 2, Abschnitt 2.5 45 N/mm<sup>2</sup>

Um die Einbaubedingungen besser simulieren zu können, wurde eine zweite Scheiteldruckprüfung mit zwei Probekörpern mit je einer Länge von 50 mm, die eine Woche unter Wasser gelagert wurden, unternommen. Die Proben waren anschließend vollständig mit Wasser gesättigt. Die Versuchsergebnisse und die ermittelten Ringbiegezugfestigkeiten sind in Tab. 4.3 zusammengestellt:gb40

Tab. 4.3 Versuchsergebnisse und Ringbiegezugfestigkeiten Versuchsreihe II

	Bruchkraft	Bruchkraft	$\sigma_{rbz}$
	Fu [kN]	Fu [kN/m]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Probe 1	1,6	32	29,3
Probe 2	1,4	28	25,7

### 4.5.3 Einfluß einer seitlichen Bettung

Da auf die Rohre in eingebautem Zustand nicht nur vertikale, sondern auch horizontale Kräfte wirken, wurde in einer weiteren Scheiteldruckprüfung der Einfluß einer seitlichen Bettung auf die Bruchkräfte sowie auf die Ringbiegezugfestigkeit untersucht. Die Prüfung wurde erneut in Anlehnung an die DIN 19850 durchgeführt. Die Berechnung der Ringbiegezugfestigkeiten erfolgte wie unter Kap. 4.5.2 beschrieben. Die Versuchsanordnung ist in den Abb. 4.10 und 4.11 dargestellt.



#### 4.6 Ermittlung der Schadensursachen und Beurteilung der Resttragfähigkeit

Der in der chemischen Analyse nachgewiesene sehr hohe Gehalt an Sulfidwasserstoff ( $H_2S$ ) und die vollständige Umwandlung von Kalk und edlen Metallen in Sulfide und Sulfate sowie die verschwindend geringe Menge an gasförmigen Bakterien sind eindeutige Befunde, dass es sich um eine Sulfidwasserstoffkorrosion handelt (vgl. Kap. 3.4 und 3.5).

Das vorhandene Schadensbild, d.h. die nur noch lose verbundene Korrosionszone, die Ausblühungen im Scheitellbereich und der unterhalb des Abwasserst

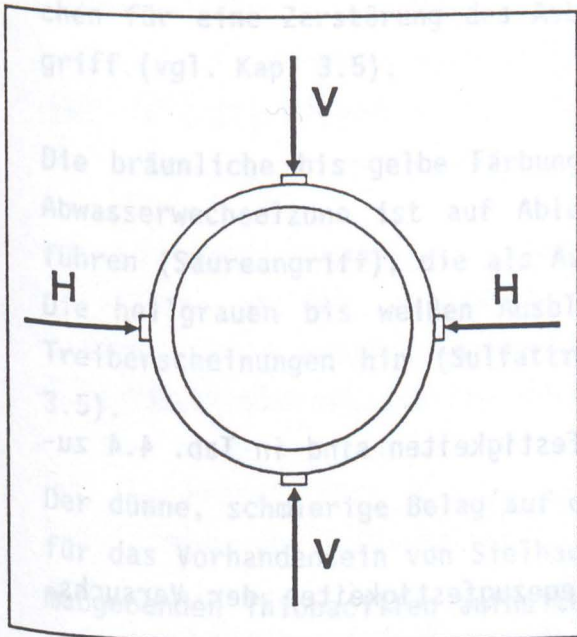


Abb. 4.10 Versuchsanordnung

H = Horizontalkraft

V = Vertikalkraft

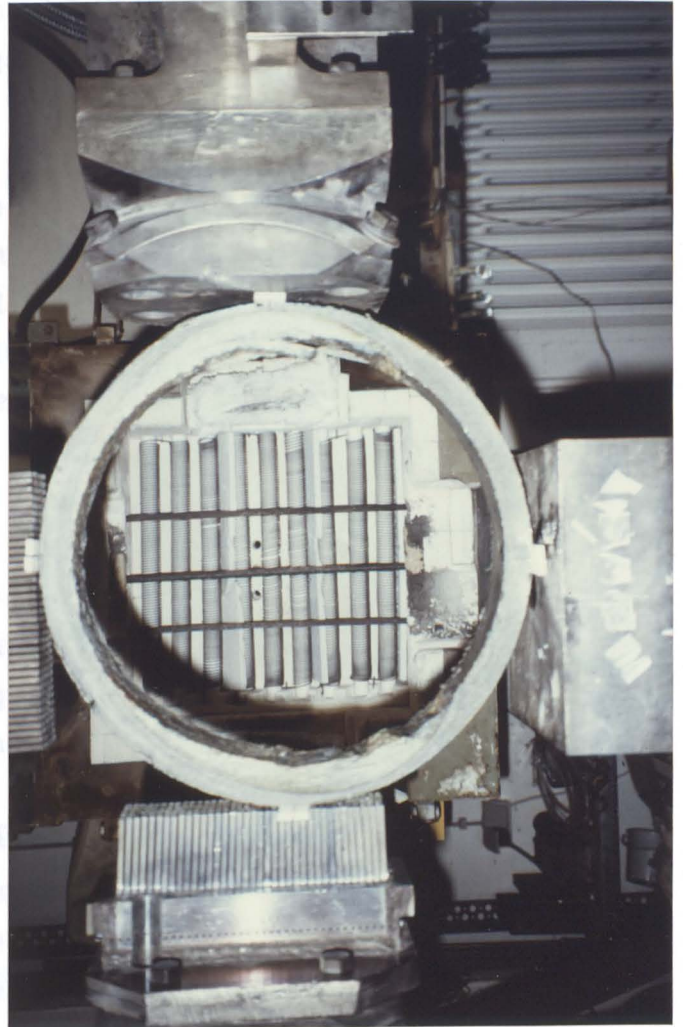


Abb. 4.11 Versuchsanordnung

Für die Prüfung standen sechs Probekörper mit einer Länge von jeweils 50 mm zur Verfügung. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Probekörper wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Eingangsvoraussetzungen in puncto Wassergehalt der Probe und Bettungsverhältnis durchgeführt. Im folgenden werden die Eingangsvoraussetzungen der drei Versuchsreihen kurz wiedergegeben:

Versuchsreihe III:

- Probennummer: 1 und 2
- Lagerung unter Wasser: eine Woche
- Bettungsverhältnis V zu H: 1:1

Versuchsreihe IV:

- Probennummer: 3 und 4
- Lagerung unter Wasser: eine Woche
- Bettungsverhältnis V zu H: 1:0,5

Versuchsreihe V:

- Probennummer: 5
- Lagerung unter Wasser: einen Tag
- Bettungsverhältnis V zu H: 1:1
- Probennummer: 6
- Lagerung unter Wasser: einen Tag
- Bettungsverhältnis V zu H: 1:0,5

Die Untersuchungsergebnisse und Ringbiegezugfestigkeiten sind in Tab. 4.4 zusammengestellt.

Tab. 4.4 Untersuchungsergebnisse und Ringbiegezugfestigkeiten der Versuchsreihen III bis V

	Bettungsver- hältniss	Bruchkraft Fu [kN]	Bruchkraft Fu [kN/m]	$\sigma_{rbz}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
Probe 1	1:1	2,9	58	53,0
Probe 2	1:1	1,8	36	33,0
Probe 3	1:0,5	1,0	20	18,3
Probe 4	1:0,5	1,5	30	27,5
Probe 5	1:1	2,0	40	36,7
Probe 6	1:0,5	2,5	50	45,8

#### 4.6 Ermittlung der Schadensursachen und Beurteilung der Resttragfähigkeit

Der in der chemischen Analyse nachgewiesene sehr niedrige pH-Wert von 2,5, die vollständige Umwandlung von Kalk und den Kalksilikathydraten in Gips und die verschwindend geringe Menge an gebildeter Salpetersäure durch nitrifizierende Bakterien sind eindeutige Belege dafür, daß es sich hier um eine BSK handelt (vgl. Kap. 3.4 und 3.5).

Das vorhandene Schadensbild, d.h. die starken Ab- und Auflösungen sowie der nur noch lose Verbund des korrodierten Materials im Bereich der Abwasserwechselzone, die Ausblühungen im Scheitelbereich des Rohres und der noch intakte Sohlbereich unterhalb des Abwasserspiegels sind ebenfalls eindeutige Anzeichen für eine Zerstörung des Asbestzements durch einen Säure- und Sulfatangriff (vgl. Kap. 3.5).

Die bräunliche bis gelbe Färbung des korrodierten Materials im Bereich der Abwasserwechselzone ist auf Ablagerungen von Schwefelverbindungen zurückzuführen (Säureangriff), die als Ausscheidungsprodukte der Bakterien entstehen. Die hellgrauen bis weißen Ausblühungen am Rohrscheitel deuten dagegen auf Treiberscheinungen hin (Sulfattreiben, Ettringitbildung; vgl. Kap. 3.4 und 3.5).

Der dünne, schmierige Belag auf der Rohrrinnenwand ist ein eindeutiger Hinweis für das Vorhandensein von Sichelhaut, in der sich die für den Korrosionsprozess maßgebenden Thiobacillen aufhalten und vermehren und in großen Mengen Schwefelsäure produzieren können (vgl. Kap. 3.3.2).

Mit Kenntnis der unter Kap. 3 gemachten Ausführungen, der Einbeziehung der örtlichen Gegebenheiten und den in der Schadensanalyse ermittelten Ergebnissen, läßt sich bei dem vorliegenden Schaden auf eine Biogene-Schwefelsäure-Korrosion schließen.

Wie bereits in Kap. 3 beschrieben, kommt es aufgrund der hervorragenden Milieubedingungen für Bakterien in Druckrohrleitungen zur Produktion erheblicher Mengen von Schwefelwasserstoffgas, das dann an den Leitungseinmündungen in Freispiegleitungen oder an Sohlabstürzen ausgast. Daher ist die vorgeschaltete Druckrohrleitung aus Richtung BS-Schäpau sehr kritisch zu beurteilen und für die Schwere des Schadens verantwortlich zu machen. Das mit dem  $H_2S$

vorhandene große Nährstoffangebot für Thiobacillen führt unweigerlich zur Produktion erheblicher Mengen an Schwefelsäure und somit zu einer schnell fortschreitenden Korrosion der Rohre.

Da es sich bei dem eingebauten Rohr um eine Druckrohrleitung handelt, die allerdings als Freispiegelleitung betrieben wird, und bei Druckrohrleitungen, die auch als solche betrieben werden, laut DIN 19800 /22/ kein ausdrücklicher Korrosionsschutz gefordert wird, sind Fehler bei der Planung der Kanalleitung nicht ausgeschlossen. Die Betriebsweise der Rohre als Freispiegelleitung hätte bei der Planung berücksichtigt werden müssen.

Das Leitungsgefälle von  $I = 1:44$  und die dadurch bedingte Abflußgeschwindigkeit von  $v = 1,81 \text{ m/s}$  sind als ausreichend zu beurteilen. Es konnten demzufolge auch keine Sohlablagerungen im Kanal beobachtet werden, so daß diese als mögliche Quelle für die Bildung von Schwefelsäure ausscheiden (vgl. Kap. 3.3.3).

Eine Innenkorrosion infolge der Produktion von Salpetersäure durch nitrifizierende Bakterien ist aufgrund der in der chemischen Analyse ermittelten Werte für Nitrate ausgeschlossen. Da nur Korrosionsschäden in den Asbestzementhaltungen aufgetreten sind und sonst keine weiteren Schäden festzustellen waren, kann davon ausgegangen werden, daß der Einbau der Rohre und die Bauausführung ordnungsgemäß durchgeführt wurden.

Bei der Prüfung der lufttrockenen Probekörper auf Scheiteldruck und Ringbiegezugfestigkeit (RBZF), die damit abweichend von denen in der Norm geforderten Prüfbedingungen für den Feuchtegehalt der Proben durchgeführt wurde (Versuchsreihe I), konnte gezeigt werden, daß die Asbestzementrohre die an sie gestellten Anforderungen nach DIN 19850 /22/ für Freispiegelleitungen, gerade noch erfüllen (s. Kap 4.5.2, Tab. 4.2). Setzt man jedoch die erforderlichen Mindestringbiegezugfestigkeiten nach DIN 19800 /22/ für Druckrohrleitungen als Vergleichsspannung an, so zeigt sich, daß die Rohre keine ausreichende Standfestigkeit mehr besitzen.

Bei einer Scheiteldruckprüfung mit vollständig wassergesättigten Proben (Versuchsreihe II) konnten die ermittelten RBZF in keinem Fall die zulässige Vergleichsspannung von  $36 \text{ N/mm}^2$  für Freispiegelleitungen erreichen (vgl. Kap. 4.5.2, Tab 4.3).

Bei der Überprüfung der RBZF mit dem Einfluß einer seitlichen Bettung wurde folgendes festgestellt (vgl. Kap 4.5.3, Tab. 4.4):

1. Die ermittelten Werte streuten in einem weiten Bereich.
2. Die RBZF nimmt mit steigendem Wassergehalt ab.
3. Die RBZF nimmt mit sinkendem Bettungsverhältnis ab (Die Proben 5 und 6 machen hier allerdings eine Ausnahme, vgl. Tab. 4.4).

Die hier getroffenen Aussagen sind allerdings aufgrund der geringen Probenzahl pro Versuchsreihe nur als Tendenz zu werten. Um statistisch abgesicherte Erkenntnisse zu erhalten, müßten noch weitere Prüfungen mit einer deutlich höheren Probenanzahl pro Versuchsreihe durchgeführt werden.

Abschließend bleibt festzustellen, daß aufgrund der vorliegenden Verformungen und der ermittelten RBZF die Resttragfähigkeit kritisch zu beurteilen ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist sie nicht ausreichend. Im Hinblick auf die weiter fortschreitende Innenkorrosion des Kanals sollte umgehend eine Sanierung der Asbestzementleitungen vorgenommen werden.

#### 4.7 Zusammenfassung

Der AWW Weddel/Lehre übergab dem IBMB der TU Braunschweig ein im November 1991 ausgebautes Teilstück eines

Asbestzement-Druckrohres 300 x 5000 - ND6 - DIN 19800

einer Schmutzwassertransportleitung des Stadtteils BS-Volkmarode, um eine Beurteilung des vorliegenden Schadens sowie der Resttragfähigkeit vorzunehmen.

Eine durchgeführte chemischen Analyse des korrodierten Materials und das erkennbare Schadensbild läßt darauf schließen, daß die Innenkorrosion durch BSK ausgelöst wurde. Ungünstige Betriebsbedingungen (vorausgehende Druckrohrleitung) und der Einsatz eines Druckrohres ohne inneren Korrosionsschutz als Freispiegelleitung deuten auf eine hohe Korrosionsrate hin und lassen vermuten, daß Fehler bei der Planung und der Auswahl der Rohrwerkstoffe gemacht wurden.

Bei einer Überprüfung der Resttragfähigkeit unter Normbedingungen (Lagerung der Proben eine Woche unter Wasser) konnte gezeigt werden, daß die in den Untersuchungen ermittelten RBZF in keinem Fall die zulässige Vergleichsspannung von  $36 \text{ N/mm}^2$  für Freispiegelleitungen erreichten.

Bei der Überprüfung der Resttragfähigkeit unter Berücksichtigung einer seitlichen Bettung stellte sich heraus, daß mit zunehmendem Wassergehalt und steigendem Bettungsverhältnis die RBZF zunimmt. Allerdings wurde auch hier nicht bei allen untersuchten Proben die geforderte Mindeststringbiegezugfestigkeit erreicht, so daß keine ausreichende Resttragfähigkeit des untersuchten Asbestzementrohres vorliegt. Eine möglichst baldige Sanierung mit dem Ziel der Wiederherstellung der Tragfähigkeit und der Erhöhung der chemischen Widerstandsfähigkeit des Rohres ist unumgänglich.

## 5 MAßNAHMEN UND VERFAHREN ZUR SCHADENSVERMEIDUNG UND SCHADENSSANIERUNG

### 5.1 Einleitung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Voraussetzungen für und Einflüsse auf den Korrosionsmechanismus der BSK ausführlich beschrieben. Dem folgte anhand eines vorliegenden Schadens eine Schadensanalyse. Die Frage nach möglichen Maßnahmen zur Schadensvermeidung bzw. -sanierung ist u.a. ein Thema dieses Kapitels. Erfahrungen des Forschungsvorhabens "Demonstrationsobjekt Hamburger Sammlersystem" haben gezeigt, daß insbesondere dem Aspekt der chemischen und biologischen Widerstandsfähigkeit zementgebundener Rohrwerkstoffe bzw. den erforderlichen Schutzmaßnahmen eine größere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß. Auch noch heute erfolgt die Auswahl der Rohrmaterialien vielfach nicht nach sachlich zu begründender Eignung, sondern allein nach dem Rohrpreis. Diese Art zu entscheiden, ist aber aus volkswirtschaftlichen Gründen sehr bedenklich. Später auftretende und vom Baustoff abhängige voraussehbare Schäden können bei sachkundiger Auswahl der Rohrmaterialien vermieden werden.

Dazu werden zunächst Maßnahmen zum Schutz zementgebundener Rohrleitungen vor einer BSK kurz vorgestellt. Schwerpunkt dieses Kapitels wird jedoch sein, einen Überblick über die derzeit wichtigsten, heute gebräuchlichen und den Stand der Technik darstellenden Verfahren zur Schadensbehebung zu geben, die es ermöglichen durch BSK geschädigte Kanäle zu sanieren. Es werden die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren diskutiert, um dann ein für den vorliegenden Schaden geeignetes Verfahren auswählen zu können.

### 5.2 Korrosionsschutzmaßnahmen zementgebundener Rohrleitungen

Die exakte Bestimmung der Beanspruchungsgrade der Rohrmaterialien trägt wesentlich zur optimalen Lösung der Bauaufgabe bei. Ein Vorschlag zur Beurteilung des Angriffsgrads der BSK auf zementgebundene Rohrmaterialien wurde bereits in Tab. 3.3, Kap. 3.5 gemacht. Die Unterbewertung der Aggressivität der BSK zieht Bauwerkschäden mit Minderung der Lebensdauer, die Überbewertung volkswirtschaftlich ungerechtfertigten Mehraufwand bei der Realisierung der Bauwerke nach sich.

Bei anstehenden Sulfidproblemen sollen die zu ergreifenden Maßnahmen vor allen negativen Auswirkungen schützen. Beim Baustoffschutz beschränkt sich der Schutz auf Korrosionswirkungen. Die Ziele der Schutzmaßnahmen müssen sein:

- Unterbindung der Desulfurikation
- Umwandlung der Sulfide bereits im Abwasser
- Verhinderung des Entweichens flüchtiger Schwefelverbindungen aus dem Abwasser in die Kanalatmosphäre und ihres Niederschlags auf den Baustoffoberflächen
- Beeinflussung der Ansiedlung von Thiobacillen auf der Kanalwand
- Wahl korrosionsbeständiger Baustoffe bzw. Schutz der Baustoffe vor den Stoffwechselprodukt der Thiobacillen

Die Möglichkeiten unterschiedliche Schutzmaßnahmen dabei zum Einsatz zu bringen sind sehr vielfältig (Abb. 5.1). Generell lassen sie sich in

- **aktive Schutzmaßnahmen**, bei denen die Entstehung flüchtiger Schwefelverbindungen oder ihr Entweichen aus dem Abwasser vermieden oder gehemmt werden und
- **passive Schutzmaßnahmen**, bei denen korrosionsbeständige Baustoffe eingesetzt bzw. die Baustoffe gegen Schwefelsäure geschützt werden,

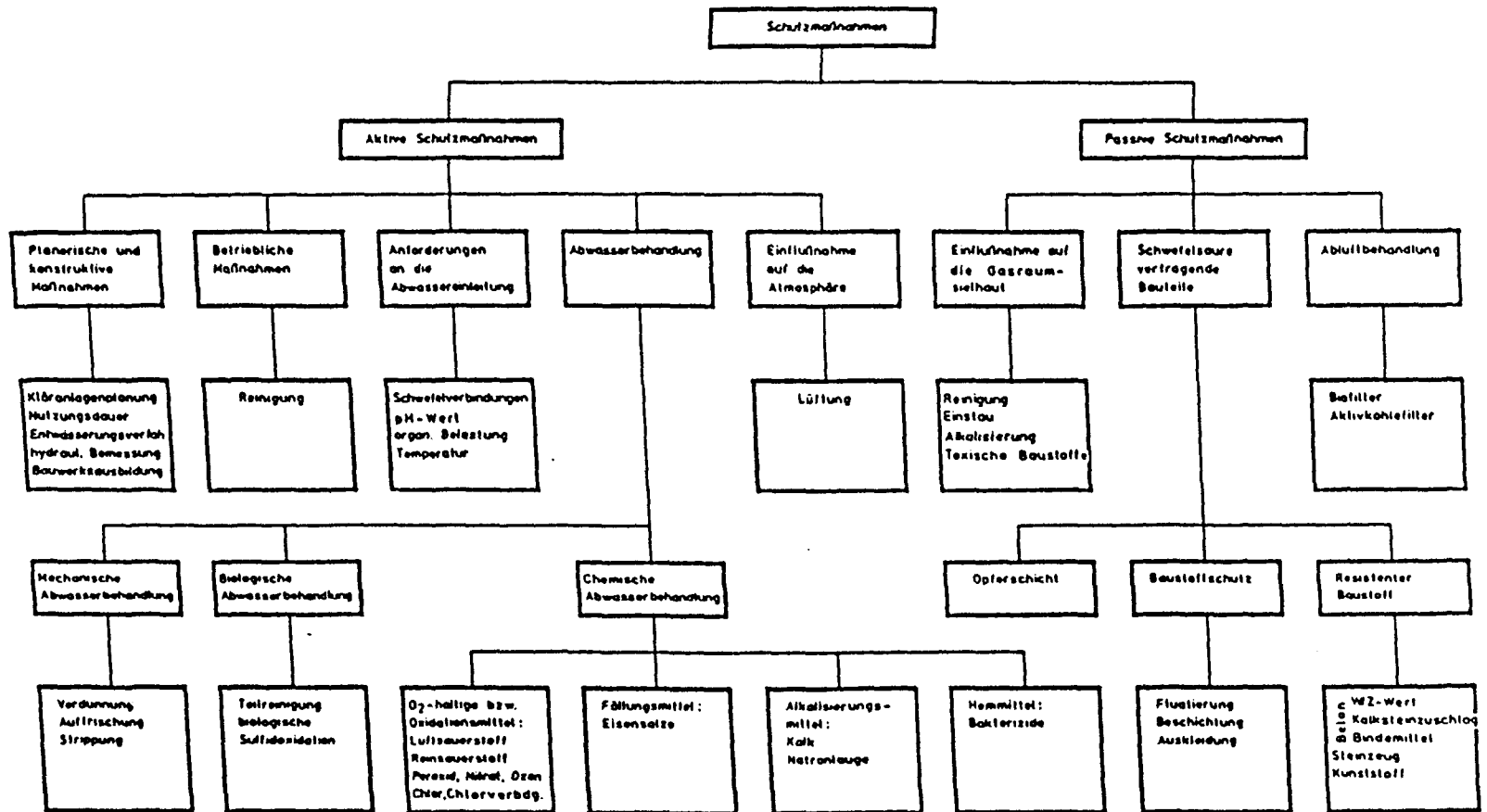
einteilen.

Grundsätzlich sind die aktiven den passiven Schutzmaßnahmen vorzuziehen, wobei alle Maßnahmen eher präventiv als curativ eingesetzt werden sollten. Die Erfordernisse von Schutzmaßnahmen wurden bislang zumeist in Bezug auf die Baustoffkorrosion beurteilt. Die folgenden Stichworte geben einige Hinweise zum Schutz zementgebundener Rohrwerkstoffe gegen BSK (siehe dazu auch /1;4;5;24;25;26/):

1. **Planung:** Kanäle sollten immer mit ausreichendem Gefälle und entsprechender Fließgeschwindigkeit ( $v > 0,6 \text{ m/s}$ ) ausgelegt werden, um Ablagerungen ( $\text{H}_2\text{S}$ -Bildung) zu vermeiden und um eine gute Sauerstoffversorgung zu gewährleisten. Auf Absturzbauwerke ist bei sulfidhaltigen Abwässern wegen der Stripeffekte zu verzichten, falls nicht besondere Vorkehrungen zum Korrosionsschutz getroffen werden und Geruchsbelästigungen nicht zu erwarten sind. Grundsätzlich sind Turbulenzen bei sulfidhaltigen Abwässern zu vermeiden.



Abb. 5.1 Übersicht der Korrosionsschutzmaßnahmen von zementgebundenen Rohrwerkstoffen /1/



2. **Betongüte:** Die Korrosion der Baustoffe richtet sich nach dem Angriffsgrad, der Zementart, dem Zuschlag, dem W/Z-Wert, der Nachbehandlung, den Zusätzen, Imprägnierungen und dem Betonalter; bei Bewehrungskorrosion auch nach der Betondeckung. Generell sind kalkärmere Zemente günstig zu beurteilen, wenn die aggressive Flüssigkeit möglichst lange nach der Herstellung vom Beton ferngehalten werden kann; anderenfalls sind kalkreichere Portlandzemente vorzuziehen. Dem Sulfatangriff kann durch die Verwendung von HS-Zementen begegnet werden. Die Vor- und Nachteile kalkhaltiger bzw. quarzitischer Zuschläge werden in der Literatur kontrovers dargestellt, allerdings versprechen die kalkhaltigen Zuschläge eine etwas längere Nutzungsdauer bei einem Angriff von Schwefelsäure als quarzitisches Zuschläge. Die Nachbehandlung des Betons ist von besonderer Wichtigkeit für die Dichtigkeit, die Karbonatisierung und somit entscheidend für die Korrosionsträgheit. W/Z-Werte von 0,4 sind anzustreben, da mit sinken dem W/Z-Wert die Kapillarität reduziert wird und der Diffusion von Gasen und Wasser ein größerer Widerstand entgegen gesetzt wird. Hohe Zementgehalte verzögern allerdings die Karbonatisierung. Zur Verbesserung der Konsistenz und der Verarbeitbarkeit können dem Beton Betonverflüssiger zugegeben werden. Mit fortschreitendem Alter, d.h. mit zunehmender Hydratation des Zements, nehmen Wasseraufnahmefähigkeit und Kapillarität ab; der Beton wird korrosionsbeständiger. Arbeitsfugen sollten wenn möglich vermieden werden.

3. **Beschichtungen:** Man kann davon ausgehen, daß die üblichen Mehrfach-Anstriche bis etwa 200  $\mu\text{m}$  nicht diffusionsdicht sind /27/. Erfahrungen in Hamburg haben gezeigt, daß mit Innenbeschichtungen, die sowohl mit lösemittelhaltigen als auch lösemittelfreien Epoxidharzbeschichtungen hergestellt wurden, wobei die Schichtdicke von 0,3 mm bis 3,0 mm variierte, selbst unter Einhalten aller Randbedingungen bezüglich der vorhandenen Reinigung und Beschaffenheit der Betonoberfläche, keine befriedigenden Ergebnisse erzielt wurden.

In beiden Fällen wurde eine Blasenbildung in den Beschichtungen festgestellt, so daß Beschichtungen auf Kunstharzbasis als unzureichender Beton-Korrosionsschutz anzusehen sind.

4. **Opferbetonschichten:** Bei schwachem bis mittlerem biogenen Säureangriff hat sich das Aufbringen einer Opferbetonschicht bewährt, sofern sich mit einiger Sicherheit der Korrosionsfortschritt voraussagen und die bei der Planung festgelegte Nutzungsdauer so einhalten läßt. Der Opferbeton sollte mit kalkhaltigen Zuschlagstoffen hergestellt werden.
5. **Bakterizide und Hemmsubstanzen:** Versuche, die Betonoberfläche mit Bakteriziden zu behandeln, um ein Wachstum der Säurebildner zu unterbinden, hatten bislang noch nicht den gewünschten Erfolg. Zum einen müssen sich die Bakterizide jahrzehntelang auf der Betonoberfläche halten, zum anderen dürfen sie sich nicht im Abwasser lösen, da sonst die biologische Stufe der Kläranlage oder der Vorfluter geschädigt werden. Teerhaltige Anstriche, die früher manchmal verwendet wurden, scheinen einen gewissen bakteriziden Effekt zu haben. Die verschiedentlich versuchte Zugabe von Hemmsubstanzen (z.B. Chlor) hat sich nicht bewährt.
6. **Vermeidung anaerober Zonen:** Die Vermeidung anaerober Vorgänge im Kanal durch Zugabe von Sauerstoff ins Abwasser hat in vielen Fällen Erfolg gebracht. Für die Oxidation von 1 kg Sulfid werden theoretisch 0,5 kg O<sub>2</sub>, praktisch jedoch, auf Grund der Sauerstoffzehrung der organischen Stoffe, 0,8 kg bis 2,0 kg O<sub>2</sub> und mehr benötigt.

Einige mögliche Methoden werden kurz beschrieben /27/:

- a) **Belüften von Druckrohrleitungen, Pumpensämpfen etc.**
  - Erfolg : bei geringem Fäulnisgrad des Abwassers sehr gut
  - Vorteile : preiswert (nur 1-2 kWh/kg O<sub>2</sub>) und einfach
  - Nachteile: durch den in der Luft enthaltenen Stickstoff etc. werden Geruchsstoffe ausgestrippt; Luftsäcke in den Leitungen
- b) **Rein-Sauerstoff**
  - Erfolg : sehr gut, sofern nicht zu hohe O<sub>2</sub>-Zehrung bei warmen und stärker verschmutzten Abwässern vorliegt
  - Vorteile : kein Strippen von Geruchsstoffen, keine großen Maschineneinrichtungen
  - Nachteile: Sauerstoff muß gekauft und regelmäßig geliefert werden. Kosten höher als beim Belüften. Die derzeitigen Be- gasungsvorrichtungen sind nicht optimal

c)  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Zugabe

Erfolg : sehr gut

Vorteile : wie beim Rein-Sauerstoff; zusätzlich: sehr einfache Dosierung

Nachteile: sehr teuer

d) Nitrat-Zugabe

Erfolg : nur bei sehr geringen Zehrungsraten anwendbar

Vorteile : Trockendosierung

Nachteile: zusätzliche Aufsalzung, bei größeren Mengen sehr teuer

e) Binden von Sulfiden durch Eisensalze ( $5\text{-}8 \text{ kg FeCl}_3/\text{kg H}_2\text{S}$ )

Erfolg : nur begrenzt anwendbar

Vorteile : Eisensalze und Eisenoxide leicht beschaffbar

Nachteile: zusätzlicher Schlamm, Schlammablagerungen möglich, keine Eisensulfate verwendbar

7. Verhinderung der  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Bildung:

a) Starkes Belüften, damit die Sulfide sofort abgeführt werden und ggf. die Kanalatmosphäre unter 75% relativer Luftfeuchte gehalten wird.

Erfolg : nicht immer gewährleistet

Vorteile : bessere  $\text{O}_2$ -Versorgung der Abwasseroberfläche

Nachteile: Geruchsprobleme, Belüftungsaggregate

b) Einstau der Leitungen

Erfolg : keine  $\text{SO}_4^-$ -Bildung möglich

Vorteile : einfache Methode

Nachteile: hydraulische Störung, Ablagerungen

c) Zugabe von Alkalien (z.B. Kalk) zur Anhebung des pH-Wertes

Erfolg : nicht sicher

Vorteile : keine nennenswerten

Nachteile: zusätzlicher Schlamm, Schlammablagerungen, Beeinflussung der Kläranlage, teuer

d) Verhinderung des Zutritts von Sauerstoff in die Kanalatmosphäre durch Luftschleusen und dichte Kanaldeckel

Erfolg : zweifelhaft

Vorteile : einfach

Nachteile: nicht immer konsequent durchführbar, das Anfaulen des Abwasser wird verstärkt, das Problem nur verlagert

Tab 5.1 Beurteilung möglicher Chemikalien als Korrosionsschutzmaßnahme /3/

Beurteilungskriterien		Gase			Wasserstoffperoxid	Kaliumpermanganat	Nitrat	Natriumhypochlorit	Eisensalze		Alkalien		Biozide
		Luft-sauerstoff	Rein-sauerstoff	Ozon					Fe(II)	Fe(III)	Kalk	Natron-lauge	
		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	KMnO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NaOCl	Fe <sup>+2</sup>	Fe <sup>+3</sup>	Ca <sup>2+</sup>	NaOH	
Grund-sätz-liche Eig-nung	bei Druckleitungen	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	bei Freispiegelleitungen	0	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	bei geringer Sulfidbildg.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	bei starker Sulfidbildg.	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
	Einsatzhäufigkeit	+	+	-	0	-	-	-	-	-	0	-	-
Wirkung bei Sul-fid-pro-blemen	präventive Wirkung	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	curative Wirkung	0	+	+	+	+	-	+	+	+	0	0	0
	sichere Wirkung	-	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
	Reaktionszeit Sulfidoxid	-	0	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
	zusätzl. O <sub>2</sub> -Bedarf	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Son-stige Wir-kungen auf das Abwas-ser	Abwasseraufsalzung	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
	aerober Abbau org. Subst.	+	+	+	+	+	0	0	+	+	+	+	+
	unerwünschte Oxydationen	+	+	-	-	-	+	-	+	+	0	+	+
	unerwünschte Reaktionspr.	+	+	+	+	+	+	-	0	0	0	0	+
	pH-Wert-Veränderung	+	+	+	+	+	+	+	-	0	0	0	0
	Redox-Pot.-Veränderung	0	+	+	+	+	+	+	0	-	-	+	+
	Absetzeigenschaften Ab-leitung	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	0	0
	Absetzeigenschaften Reini-gung	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	+	+
	Bakterizidität	+	+	-	-	-	+	-	+	+	+	+	+
Be-trieb-liche Wir-kungen	hydraulisch bei Druck-leitungen	-	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+
	Geräuschemissionen	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+
	Schlammfall	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	0	-
	sinnvolle Überdosierung	0	+	+	+	+	0	-	-	-	0	+	+
	metallkorrosives Mittel	+	0	-	-	-	+	-	+	+	0	-	-
	gesundheitsschädl. Mittel	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
	explosives Mittel	+	-	-	+	+	+	+	+	+	0	0	0
Hand-bar-keit	Lagerung	+	0	-	0	0	0	0	0	0	+	+	+
	Dosierung	-	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Löslichkeit, Verteilung	-	0	+	+	0	-	+	+	+	0	0	0
Kosten Auf-wand	Investition	0	0	-	0	0	0	0	+	0	0	-	-
	Chemikalienkosten	+	0	-	-	-	0	0	+	+	+	+	+
	Energiekosten	-	0	-	+	+	+	0	0	0	0	0	0
	Betriebs-/Wartungsauf-wand	+	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beurteilung:    + günstig    0 indifferent    - ungünstig													

Hinweise zur Beurteilung des Einsatzes verschiedener Chemikalien als präventive oder auch curative Dosierungsmaßnahmen in das Abwasser von Druck und Freispiegelleitungen gibt Tabelle 5.1. Zusammenfassend bleibt für die Biogene-Schwefelsäure-Korrosion festzuhalten, daß bei schwachem bis mittlerem Angriff, d.h. bei pH-Werten über 3, durch die oben beschriebenen Korrosionsschutzmaßnahmen, das gilt insbesondere für die betontechnischen Maßnahmen, die Innenkorrosion von zementgebundenen Baustoffen beherrscht werden kann.

### 5.3 Verfahren zur Schadensbehebung

#### 5.3.1 Allgemeines

Die in der heutigen Zeit eingesetzten Verfahren zur Schadensbehebung orientieren sich an den Schadensbildern, die in den Kanälen vorliegen. Diese Verfahren können in drei Hauptgruppen eingeteilt werden /28/:

- Instandsetzung
- Sanierung
- Erneuerung

Das maßgebende Kriterium für die Anwendung der Verfahren ist der Schadensumfang. Es wird unterschieden nach örtlich begrenzten, örtlich begrenzten wiederholten und umfangreichen Schäden. Im Rahmen der Schadensbehebung muß es Ziel sein, auch die Schadensursachen mit zu beseitigen, um wiederholtes Auftreten von Beeinträchtigungen zu vermeiden. Welches Verfahren letztlich zum Einsatz gelangt, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Im einzelnen sind dies:

- Die örtliche Situation
- Die Lage im Entwässerungsnetz
- Die Art des Kanals
- Konstruktionsdetails
- Abwasserverhältnisse in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
- Äußere Lasten in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft
- Bisherige Maßnahmen zur Wartung/Reinigung/Inspektion und Schadensbehebung
- Zustand der Rohre

Weiterführende Angaben sind /28/ zu entnehmen. Anhand des Flußdiagramms in Abb. 5.2 läßt sich die Auswahl der Verfahrenshauptgruppen bei bestimmten Schadensbildern vornehmen.

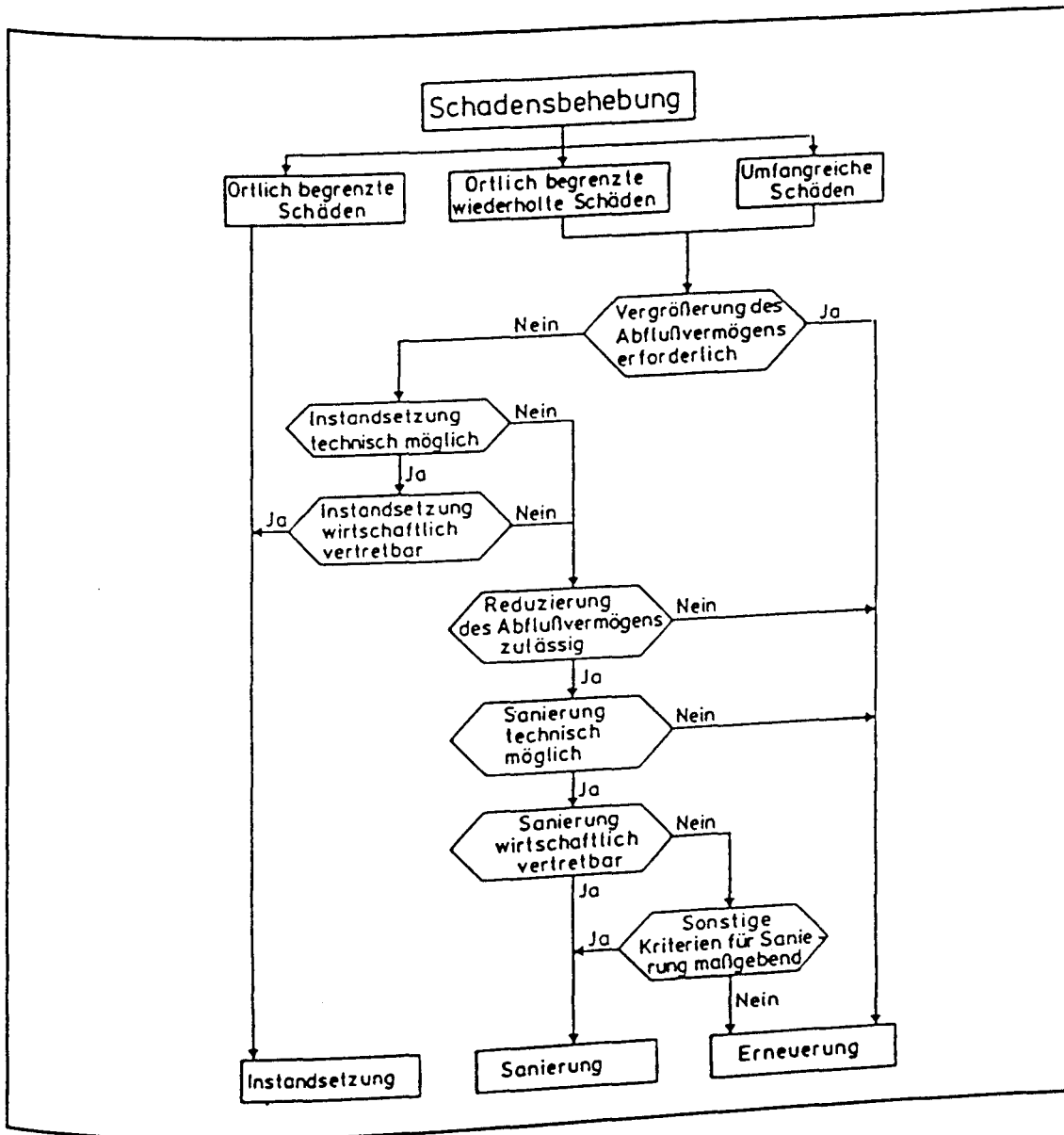


Abb. 5.2 Flußdiagramm zur Auswahl der Verfahrenshauptgruppen zur Schadensbehebung /29/

Jeder dieser drei Hauptgruppen lassen sich Spezialverfahren zuordnen. Sie sind in Abb. 5.3 dargestellt.

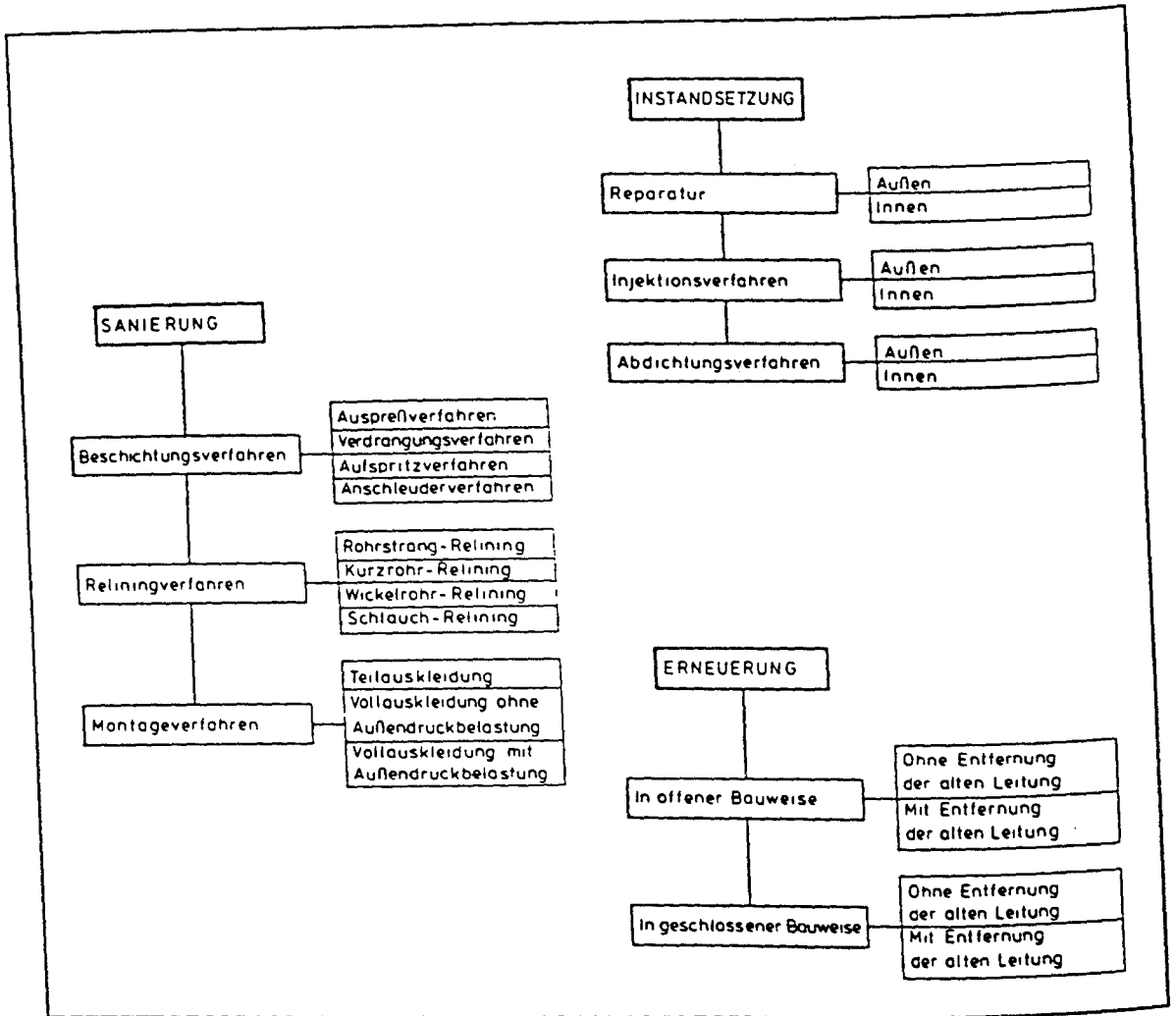


Abb. 5.3 Übersicht über die Verfahren zur Schadensbehebung /28/

An dieser Stelle soll nur auf die wichtigsten, heute im Einsatz befindlichen Verfahren, eingegangen werden. Hierzu wurde im Rahmen einer Studie /30/ eine Umfrage gemacht, die das in Tabelle 5.2 wiedergegebene Ergebnis lieferte.

Wie man aus den vielen Einflußfaktoren ersehen kann, ist es nicht möglich, für einen bestimmten Schaden eine alleingültige Sanierungsmethode auszuwählen. Schadensart und -umfang geben den groben Rahmen für die Verfahrenswahl vor. Letztlich bestimmen die örtlichen Randbedingungen über das zu wählende Instandsetzungsverfahren.



Tab. 5.2 Anzahl ausgewerteter Kommunen (46) in Deutschland, die Verfahren zur Schadensbehebung mindestens ein mal angewendet haben /30/

Verfahrensgruppe	Verfahren	Anzahl der Anwender Absolut	Anzahl der Anwender %
Injektionsverfahren	Penetryn/Posatryn	23	50
	Seal-i-Tryn	0	0
	Cherne	0	0
Beschichtungsverfahren	Anschleuderverfahren	10	22
Reliningverfahren	Rohrstrang-Relining	6	13
	Kurzrohr-Relining	11	24
	Schlauch-Relining	16	35
	(Insituform, KM-Inliner)		
Montageverfahren	Sohlauskleidung	7	15
	Auskleidung des Gasraumes	2	4
	Vollauskleidung	1	2
Erneuerungsverfahren in geschlossener Bauweise	KM-Berstlining	1	2
Kein oben genanntes Verfahren		5	11

Nachfolgend werden kurz die Grundkonzeptionen der wichtigsten bis dato im Einsatz befindlichen Sanierungsmethoden dargestellt, Einsatzgebiete und Werkstoffe behandelt sowie Vor und Nachteile der Verfahren aufgezeigt. Oftmals entscheiden nur geringe Verfahrensmodifikationen über den Einsatz eines speziellen Verfahrens auf der Baustelle.

### 5.3.2 Instandsetzungsverfahren

Unter Instandsetzung versteht man Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sollzustandes bei örtlich begrenzten Schäden der Betrachtungseinheit durch

- Reparatur,
- Injektionsverfahren oder
- Abdichtungsverfahren /28/.

Da es sich bei der BSK um einen flächenhaften und in keinem Fall um einen örtlich begrenzten Schaden handelt, wird auf die Instandsetzungsverfahren nicht näher eingegangen.

### 5.3.3 Sanierungsverfahren

#### 5.3.3.1 Allgemeines

Unter Sanierung versteht man nach ATV Arbeitsblatt M 143 /29/:

"Maßnahmen zur Wiederherstellung des Soll-Zustandes schadhafter Kanalisationen durch deren technische Veränderung unter Erhaltung ihrer Substanz".

Zur Durchführung der Maßnahmen dienen:

- Beschichtungsverfahren,
- Reliningverfahren oder
- Montageverfahren.

#### 5.3.3.2 Beschichtungsverfahren

Beschichtungsverfahren dienen dem Aufbringen einer geschlossenen Schicht auf die Rohrwandung, zur Wiederherstellung oder Erhöhung des Widerstandes gegen mechanische und/oder chemische, biologische Angriffe, zur Verhinderung einer erneuten Bildung von Inkrustationen sowie der statischen Tragfähigkeit und der Wasserdichtheit. Bei diesen Verfahren sind in der Regel Querschnittsreduzierungen nicht zu vermeiden. Das Forschungsvorhaben "Demonstrationsobjekt Hamburger Sammlersystem" zeigte, daß zur Sanierung von Kanalisationen ausschließlich Mörtelbeschichtungen in Frage kommen /28;31/ (vgl. Kap. 5.2).

Bei den Mörtelbeschichtungen unterscheidet man je nach Art der Aufbringung folgende Verfahren:

- Auspressverfahren
- Verdrängungsverfahren
- Aufspritzverfahren
- Anschleuderverfahren.

Hier wird das Anschleuderverfahren als eines der bekanntesten und in der Anwendung bewährten Methoden kurz behandelt (vgl. Tab. 5.2). Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich umfangreiche Schäden, die in einer Haltung auftreten, sanieren z.B.:

- Längs- und Querrisse,
- Korrosionsschäden und
- bedingt Scherbenbildung.

Das Verfahren ist, mit Ausnahme von Kunststoffen, bei allen zu sanierenden Rohrwerkstoffen einsetzbar. Es läßt sich außerdem nur bei Kreisquerschnitten verwenden. Entsprechende Gerätekonfigurationen für Eiprofile sind in der Entwicklung. Beim Centriline-Verfahren wird durch einen schnell rotierenden Schleuderkopf der Beschichtungswerkstoff gegen die Rohrwand geschleudert. Abb 5.4 zeigt eine Skizze des Prinzips dieses Verfahrens.

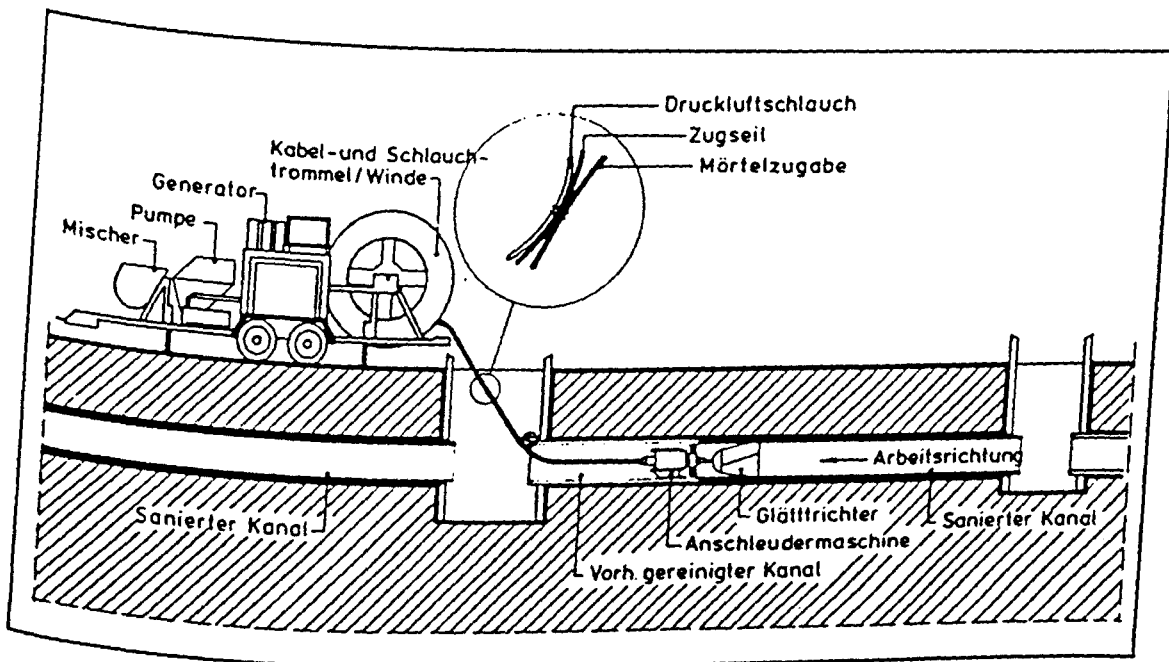


Abb. 5.4 Anschleudern von Zementmörtel und Glättung mit Glätttrichter /32/

Dieses Verfahren ist auch einsetzbar bei Rohrdurchmessern  $> \text{DN } 800$ , wobei eine leicht modifizierte Gerätekonfiguration erforderlich ist. Der Personalbedarf im nicht begehbaren Bereich liegt bei 6 Personen. Die Kosten einer Sa-

nierung nach dem Anschleuderverfahren betragen ca. 20% bis 50% einer Leitungsneuverlegung /28/.

Das Anschleuderverfahren bietet folgende Vorteile:

- Einsetzbar nahezu unabhängig von Nennweite und Haltungslänge
- Beschichtung auf Beton, Steinzeug, Asbestzement, Stahl, Guß und Klinkermauerwerk möglich
- Neben Zementmörteln lassen sich auch reaktionsharzmodifizierte Zementmörtel oder Reaktionsharzmörtel verarbeiten
- Verbesserung des Tragverhaltens der Rohrleitung durch Beteiligung der abgebundenen Mörtelschale an der Tragwirkung der Verbundkonstruktion bei vorhandener Haftung
- Zugabe von Fasern zur Tragfähigkeitserhöhung möglich
- Schichtdicke auch innerhalb einer Haltung variierbar
- Hohe Arbeitsgeschwindigkeiten mit Leistungen von ein bis zwei Haltungen (ca. 150 m) pro Tag
- Anschlußkanäle bilden keine wesentlichen Störfaktoren.

Als Nachteile sind zu nennen:

- Zu sanierende Haltungen und Anschlußkanäle sind außer Betrieb zu setzen
- Untergrund ist in Abhängigkeit von dem gewählten Beschichtungsmörtel sorgfältig vorzubereiten
- Glättung nur bei kreisrunden Leitungen ohne Rohrversatz möglich.

#### 5.3.4 Relining-Verfahren

Die Relining-Verfahren dienen zum abschnittsweisen Einbringen der Inliner a priori oder nach einer Aushärtungszeit selbsttragender Rohre in die zu sanierende Leitung zur Wiederherstellung oder Erhöhung des Widerstandsvermögens gegen mechanische und/oder chemische, biologische Angriffe, zur Verhinderung einer erneuten Bildung von Inkrustationen, zur Wiederherstellung und/oder Erhöhung der statischen Tragfähigkeit sowie der Wasserdichtheit /33/. Bei allen Relining-Verfahren werden Querschnittsabminderungen der Leitungen vorgenommen. Dies ist nicht weiter als kritisch zu beurteilen, denn im allgemeinen verringert sich das Abflußvermögen nicht, da die neuen Rohre technisch glatter sind als die zu sanierenden Leitungen /28/.

#### 5.3.4.1 Rohrstrang-Relining

Das Rohrstrang-Relining-Verfahren läßt sich bei fast allen Schadensarten anwenden, außer bei Leitungseinbrüchen und, je nach Schadensumfang nur bedingt, bei Leitungsverformungen und Lageabweichungen. Das Verfahren ist bei allen zu sanierenden Rohrwerkstoffen einsetzbar. Die Querschnittsformen der zu sanierenden Rohre spielen dabei keine Rolle. In der Regel werden Kreisquerschnitte im Nennweitenbereich DN 80 bis DN 2000 bei Längen bis zu 700 m in Abhängigkeit vom Zustand der Trasse saniert.

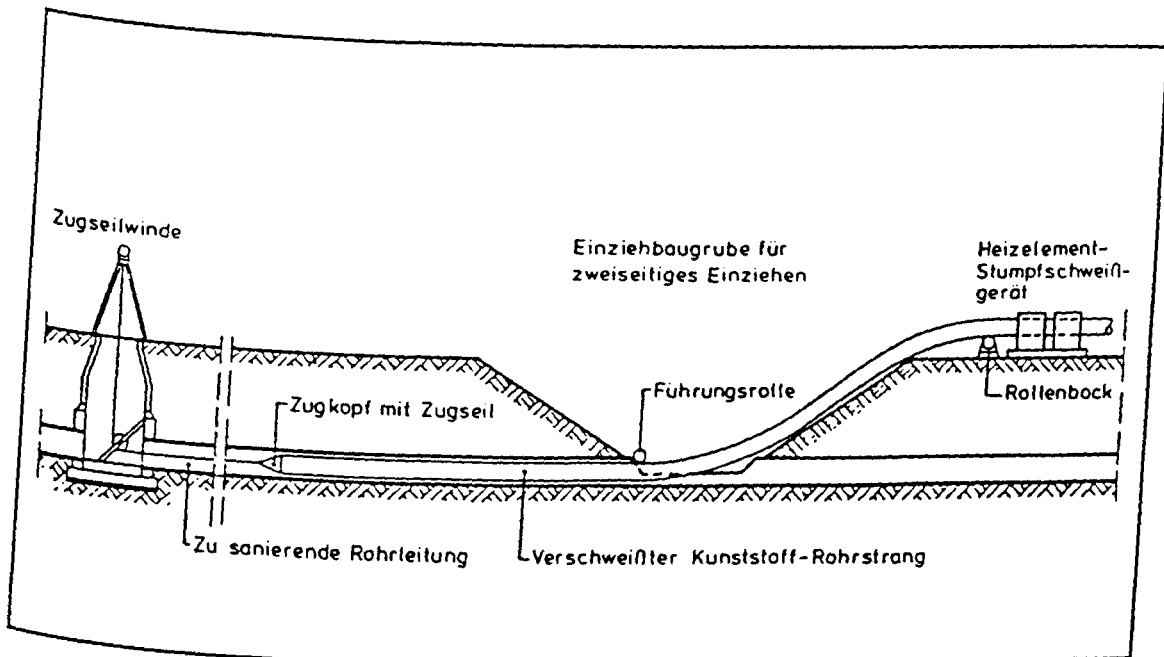


Abb. 5.5 Schematische Darstellung des Rohrstrang-Relinings /28/

Bei der Verfüllung des Ringraumes können die Ausführungen des DVGW-Arbeitsblattes W 307 /34/ sinngemäß angewendet werden. Durch die Verfüllmaterialien wird der Inliner durch Auftriebskräfte und hydrostatischen Druck beansprucht. Es besteht die Gefahr des Beulens, was bei der Bemessung zu beachten ist. Bei Inlinern von standsicherheitsgefährdeten Kanälen muß der Ringraum grundsätzlich verfüllt werden. Dabei bieten sich folgende Vorteile:

- Verhinderung des Einsturzes der defekten Leitung
- Erzeugung eines Verbundsystems

- Fixierung und gleichmäßige Bettung des Inliners
- Auftriebssicherung beim Eindringen von Grundwasser in den Ringraum
- Kompensierung unterschiedlicher Wärmedehnungen
- Verfüllung vorhandener Hohlräume auch außerhalb der Leitungen

Diese Vorteile lassen es ratsam erscheinen, diese Maßnahme in jedem Fall anzuwenden. Das Rohrstrang-Relining bietet folgende Vorteile:

- Einsetzbar für große Haltungslängen bis max. 700 m in Abhängigkeit von der örtlichen Situation
- Einsetzbar bei Inlinern aus HDPE bis DN 1600
- Durchgehender geschweißter Rohrstrang (keine Rohrverbindungen)
- Rohrstrang kann vor dem Einsetzen kontrolliert und geprüft werden
- Der Inliner besitzt eine glatte Innenwand und ist im hohen Maße beständig gegen mechanische und chemische Angriffe
- Kurze Bauzeit
- Geringe Verkehrsbeeinträchtigungen
- Wiederherstellen oder Erhöhen der statischen Tragfähigkeit
- Verkleinern von Querschnitten bei überdimensionierten Leitungen
- Möglichkeit einen Freispiegelkanals in eine Druckrohrleitung umzustellen

Mögliche Nachteile sind:

- In Abhängigkeit von der Tiefenlage der Leitung sind relativ lange Einziehbaugruben erforderlich
- Im nicht begehbaren Nennweitenbereich aufwendiges Wiedereinbinden von Anschlußkanälen
- Querschnittsreduzierung der zu sanierenden Leitung
- Versatz, Scherbenbildung, Deformationen oder Brüche der Leitung können den Einziehvorgang beeinträchtigen und unter Umständen den Inliner beschädigen
- Notwendigkeit der Ringraumverfüllung mit der Gefahr des Beulens des Inliners
- Einhalten eines exakten Gefälles besonders bei einem großen zu verfüllenden Ringraum ist schwierig
- Außerbetriebnahme der zu sanierenden Leitung einschließlich der Anschlußkanäle für die Dauer der Sanierungsarbeiten.

#### 5.3.4.2 Kurzrohr-Relining

Mit diesem Verfahren lassen sich fast alle Schadensarten sanieren. Eine Ausnahme stellen lediglich Leitungseinbrüche dar. Der zu sanierende Rohrwerkstoff spielt keine Rolle. Die einzubindenden Kurzrohre sind an kein spezielles Rohrmaterial gebunden und damit weitestgehend an die unterschiedlichsten Querschnittsformen und Nennweiten anpassbar.

Bei der Vielzahl der verwendeten Rohrmaterialien wurden dementsprechend viele Muffenverbindungen entwickelt, um für jeden Werkstoff optimale Kopplungs- und Dichtungselemente zu Verfügung zu haben. Durch die teilweise sehr feine Muffenkonstruktionen kann es zu Schwierigkeiten bei der Dichtheit kommen /28/. Der Lastfall "Rohreinbau" ist bei der Muffenausbildung zu beachten.

Lassen es die Schachtabmessungen nach Abnehmen des Schachthalses (Konus) zu, die gewählte Einzelrohrlänge und das Arbeitsgerät in den Startschacht einzubringen, so braucht keine Startbaugrube ausgehoben werden. Beim Kurzrohr-Relining werden diskontinuierlich selbsttragende Einzelrohre in die zu sanierende Haltung eingebaut. In Abhängigkeit von den Beanspruchungen des Inliners werden folgende Varianten unterschieden /35/:

- Einziehverfahren
- Einschubverfahren
- Einfahrverfahren

Es besteht die Möglichkeit, innerhalb einer Haltung die einzelnen Verfahren zu kombinieren. Wie auch beim Rohrstrang-Relining wird nach Abschluß des Einbringvorganges der verbleibende Ringraum verfüllt. Werden bei Muffenverbindungen Elastomerdichtungen eingesetzt, ist beim Verfüllen darauf zu achten, daß der Injektionsdruck nicht zu hoch wird, da sonst Injektionsmittel in die Leitung eindringen kann.

Neben den beim Rohrstrang-Relining unter den Positionen sechs bis neun genannten Vorteilen bietet des Kurzrohr-Relining unabhängig von der Art der Einbindung weitere generelle Vorteile wie:

- Keine oder nur kurze Baugruben erforderlich, damit verbunden Reduzierung der Erdarbeiten und Verkehrsstörungen

- Weitgehende Unabhängigkeit von Rohrwerkstoffen, -nennweiten und -querschnittsformen
- Einfacheres Wiedereinbinden der Anschlußkanäle durch Einbringen entsprechend präparierter Einzelrohre
- Besonders geeignet für kurze zu sanierende Haltungslängen

Zusätzlich zu denen in Kapitel 5.3.4.1 unter den Position zwei bis sieben genannten Nachteilen sind hier noch folgende zu nennen:

- Große Anzahl von Rohrverbindungen
- Ringraumverfüllung erfordert in Abhängigkeit von der Art der Rohrverbindung und der Inliner-Querschnittsform erhöhte Sorgfalt bei der Festlegung und Kontrolle des Injektionsdruckes
- Erhöhter Zeit- und Kostenaufwand gegenüber dem Rohrstrang-Relining

#### 5.3.4.3 Wickelrohr-Relining

Das erst am Anfang der achtziger Jahre entwickelte RIB-LOC-Relining-System (Expander Pipe) gehört zu den weniger bekannten Sanierungsmethoden, die sich derzeit auf dem Markt befinden. Es basiert auf PVC-hart-Stegprofilen, die innerhalb des Einstiegkanals kontinuierlich durch eine spezielle Wickelmaschine zu einem Rohr geformt werden. Der Verbund der Rohrverbindung erfolgt durch zwei auf der gesamten Berührungsfläche durchlaufende Schnappverschlüsse. Durch Auftragen eines Klebers in den Verbindungsbereich wird die Wasserdichtigkeit bei der Herstellung gewährleistet. Die verwendeten Materialien sind Kunststoffe, die je nach Gegebenheiten den äußeren Randbedingungen angepaßt werden können.

Es lassen sich so Querschnittsgrößen von 75 mm bis 2600 mm herstellen, wobei die Querschnittsform und die zu sanierenden Rohrwerkstoffe keine Rolle spielen. Das Verfahren ist bei allen Schäden mit Ausnahme von Leitungseinbrüchen einsetzbar. Die Vorarbeiten sind mit denen des Rohrstrang-Relinings identisch, wobei auf Baugruben verzichtet werden kann.

Die Rohre lassen sich durch Wahl der Werkstoffe und T-Stege den statischen Erfordernissen anpassen. Die Vorteile dieses Verfahrens entsprechen denen in Kapitel 5.3.4.1 unter Position sechs bis neun aufgeführten Punkten. Die Nach-



teile dieses Verfahrens lassen sich im gleichen Kapitel, den unter Position zwei bis sieben genannten Punkten, entnehmen.

#### 5.3.4.4 Schlauch-Relining

Das Schlauch-Relining-Verfahren ist laut Tabelle 5.2 die am häufigsten verwendete Methode im Bereich der Relining-Verfahren. Im Gegensatz zum Rohr-Relining wird bei dieser Methode ein vorkonfektioniertes, kunstharzgetränktes Trägermaterial (z.B. Gewebeschlauch) in die zu sanierende Haltung eingebracht und unter Druck an die Rohrrinnenwand gepreßt, wo es dann zum "Insitu-Rohr" aushärtet. Nach der Art der Erhärtung unterscheidet man zwischen:

- Insituform-Verfahren
- Copeflex-Verfahren
- KM-Inliner-Verfahren

Der Einsatzbereich ist bei allen Rohrwerkstoffen und Schadensarten gegeben. Leitungseinbrüche können mit dieser Methode nicht saniert werden. Es lassen sich alle Querschnittgrößen und -formen herstellen. Das ausgewählte Harz muß zu den chemischen, biologischen und physikalischen Beanspruchungen passen.

Die Vorteile des Insituform-Verfahrens sind:

- Kurze Bauzeit
- Die Arbeiten können von den vorhandenen Einstiegschächten aus durchgeführt werden (keine Erdarbeiten erforderlich)
- Unabhängig von Rohrwerkstoff und Querschnittsform
- Anwendbar in einem großen Nennweitenbereich und bei Haltungslängen von 300 m und mehr
- Anpassbar an unterschiedliche chemische Angriffe durch Auswahl des Kunstharzes
- Abwicklungen, Krümmungen und Deformationen der Leitungen sind verfahrenstechnisch unkritisch
- Keine Ringraumverfüllung erforderlich
- Geringe Querschnittsreduzierung im Vergleich zum Rohr-Relining
- In Abhängigkeit von der gewählten Wandstärke des Inliners wird die statische Tragfähigkeit der sanierten Leitung erhöht.

Als Nachteile sind zu nennen:

- Außerbetriebsetzen der zu sanierenden Leitung einschließlich der Anschlußkanäle
- Bei kurzen Haltungen ist der Kostenanteil für Geräteeinsatz und Baustelleneinrichtung sehr hoch
- Faltenbildung des Inliners bei Abwicklungen und Krümmungen
- Verbund zwischen Insituform-Rohr und zu sanierender Leitung kann nicht gewährleistet werden
- Bei zu langer Zwischenlagerung, selbst im Kühlfahrzeug, wird die Qualität des Harzes gemindert
- Das dichte Wiedereinbinden von Anschlußkanälen ist im nicht begehbaren Nennweitenbereich noch nicht befriedigend gelöst
- Bei Ansammlung von überschüssigem Harz im Anschlußbereich kann das nachträgliche Öffnen problematisch sein
- Gefahr der Blasenbildung bei punktuellm Ansammeln von überschüssigem Harz
- Da die Steifigkeit des Inliners sehr stark von der Kreisform abhängt, führen Abweichungen von der Form zu statischen Einschränkungen. Das Gleiche gilt, falls der Inliner größere fehlende Randwandungsbereiche überbrückt. In Verbindung mit dem Aushärtungsvorgang des Harzes schwindet der Schlauch und bildet Ablösungen

### 5.3.5 Montageverfahren

Montageverfahren sind nur in begehbaren Rohrquerschnitten (> DN 800) einsetzbar. Sie werden deshalb nicht weiter betrachtet.

### 5.3.6 Erneuerungsverfahren in geschlossener Bauweise

Unter Erneuerung versteht man nach ATV Arbeitsblatt M 143 /29/:

"Maßnahmen zur Herstellung neuer Kanalisationen, welche die Funktion der alten Außerbetriebgenommenen übernehmen, wobei unter Umständen das Abflußvermögen erhöht werden kann. Dies kann an derselben Stelle durch Auswechslung (Substanzzerstörung) oder an anderer Stelle (Substanzaufgabe) durchgeführt werden".

Die Erneuerungsverfahren bieten gegenüber den Instand- und Sanierungsverfahren den Vorteil, daß Querschnittsreduzierungen nicht in Kauf genommen werden müssen. Bei der Erneuerung wird unterschieden nach

- offener Bauweise
- geschlossener Bauweise.

Die Erneuerung in offener Bauweise wird nicht näher untersucht. Bei der Erneuerung in geschlossener Bauweise erfolgt die Auswechslung der defekten Leitungen unterirdisch, d.h. ohne Herstellung von offenen Gräben. Dabei unterscheidet man folgende Verfahren:

- Bergmännischen Stollen- und Tunnelvortrieb mit Getriebezimmerung
- Schildvortrieb
- Rohrvortrieb
- Berstverfahren.

Um die erforderlichen Arbeiten ausführen zu können, sind Start- und Zielbaugruben erforderlich. Wie aus Tabelle 5.2, Kap. 5.3.1 zu entnehmen ist, kommen solche Verfahren nur selten zur Anwendung, denn im allgemeinen wird versucht, die vorhandene Bausubstanz zu erhalten. Die einzige in der Umfrage genannte Erneuerungsmethode ist das Berstverfahren. Dieses wird daher auch im weiteren näher beschrieben.

#### 5.3.6.1 Berstverfahren

Der Grundgedanke beim Berstverfahren ist, mit einem Verdrängungskörper, der mit Hilfe eines Zugseiles durch die defekte Leitung gezogen wird, die Rohrwandung zu zerstören und in den anstehenden Boden zu verdrängen. Gleichzeitig wird eine neue Rohrleitung gleicher oder größerer Nennweite eingebaut. Das Prinzip verdeutlicht Abb. 5.14.

Voraussetzungen für den Einsatz dieses Erneuerungsverfahrens sind kreisförmige Rohrquerschnitte, möglichst spröde Rohrwerkstoffe wie z.B. Steinzeug und unbewehrter Beton, verdichtungsfähiger Boden, Grundwasserstände unterhalb der Leitungssohle sowie geradlinige Haltungsverläufe. Es lassen sich Rohrquerschnitte im Nennweitenbereich von DN 75 bis DN 400 sanieren /28;36/.

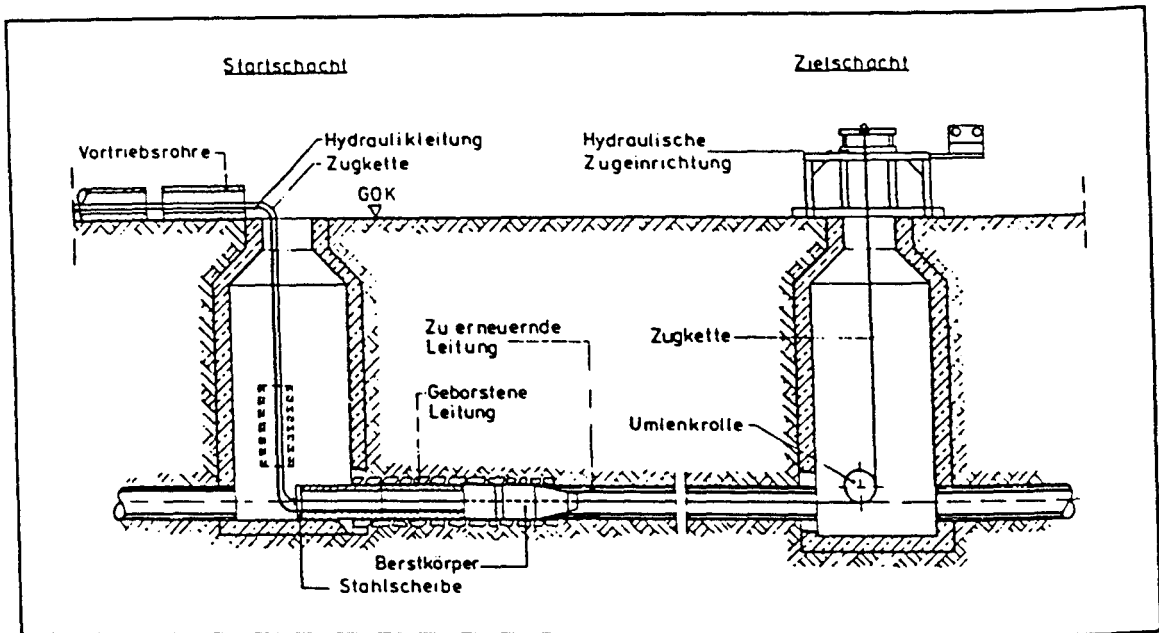


Abb. 5.14 Schematische Darstellung des Berstlining-Verfahrens /36/

Vor der Erneuerung sind die Leitungsstrecke und die Anschlußkanäle abzutrennen. Der Berstvorgang kann entweder mit dynamischer oder statischer Krafteinleitung erfolgen. Das statisch arbeitende Berstverfahren bietet folgende Vorteile gegenüber dem dynamischen Verfahren:

- Keine Erschütterung oder Lärmbelästigung
- Keine unkontrolliert vorseilenden Zerstörungen
- Keine ungewollte Verdichtung des Bodens im Bereich der Leitungszone in Verbindung mit Setzungen der Straßenoberfläche bzw. benachbarter Leitungen.

Vorteile dieses Verfahren sind:

- Geringerer Kostenaufwand als bei der Erneuerung in offener Bauweise
- Keine Erhöhung der Kosten in Abhängigkeit von der Verlegungstiefe
- Keine Querschnittsreduzierungen
- Wiederherstellung oder Erhöhung der statischen Tragfähigkeit
- Geringe Verkehrsbeeinträchtigungen

Als Nachteile sind aufzuführen:

- Beeinträchtigungen der Umgebung der Leitungstrasse
- Bisläng nur wenig praktische Erfahrungen vorhanden
- Aufwendige Wiederherstellung der Anschlüsse
- Höhere Kosten im Vergleich zum Relining-Verfahren

#### 5.4 Zusammenfassung

Wie der Überblick über die Schutzmaßnahmen gezeigt hat, ist es möglich, die BSK zu beherrschen bzw. zu verhindern. Grundsätzlich sind aktive Schutzmaßnahmen positiver zu beurteilen als passive.

Sind auf Baustoffoberflächen pH-Werte oberhalb 3 zu erwarten, kann der BSK zementgebundener Baustoffe mit betontechnologischen Maßnahmen wirkungsvoll begegnet werden. Bei niedrigeren pH-Werten sind passive Schutzmaßnahmen in Form von nachträglich eingebauten Auskleidungen oder Reliningrohren zu ergreifen. Vielfach können Sanierungsmaßnahmen höhere Investitionen erforderlich machen als das für einen Korrosionsschutz beim Neubau zu veranschlagen wäre.

Die Zusammenstellung der Verfahren zu Schadensbehebung von Innenkorrosion, hervorgerufen durch BSK, hat gezeigt, daß es möglich ist, je nach Schadensumfang sowie entsprechend den vorliegenden Randbedingungen, eine geeignete unterirdische Sanierungs- bzw. Erneuerungsmethode zu wählen. Die Sanierungsverfahren beruhen auf einer nachträglichen durchgehenden Innenbeschichtung bzw. Auskleidung der Rohre unter Beibehaltung der Leitungssubstanz, während bei den Erneuerungsverfahren eine komplett neue Leitung hergestellt wird, die die Funktion der alten Leitung übernimmt.

Da Sanierungsverfahren mit Nennweitenreduzierungen einhergehen, die die hydraulische Leistungsfähigkeit beeinträchtigen, können sie nicht in jedem Fall eingesetzt werden. Alle Verfahren weisen Vor- und Nachteile sowie Einsatzbeschränkungen auf. Es gibt kein Universalverfahren, das unter allen möglichen Randbedingungen gleichermaßen technisch und wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar ist. Mit steigender Anzahl von Anschlußkanälen innerhalb einer Haltung nehmen die Probleme bei der Umsetzung gewählter Sanierungsmethoden erheblich zu. Auf die Schwierigkeiten bei der Wiederherstellung von An-

schlußkanälen und Hausanschlüssen wurde nicht näher eingegangen. Sie stellt aber einen der Kernpunkte bei der Kanalsanierung dar. Unter all diesen Gesichtspunkten ist es oftmals unmöglich, unterirdische Sanierungsverfahren einzusetzen, so daß dann nur eine Sanierung oder Erneuerung in offener Bauweise in Frage kommt.

## 6 AUSWAHL EINES GEEIGNETEN VERFAHRENS ZUR SCHADENSBEHEBUNG

Wie bereits in Kap. 4 festgestellt wurde, handelt es sich bei dem vorliegenden Schaden um eine durch biogene Schwefelsäure hervorgerufene großflächige Innenkorrosion. Wie sich weiterhin gezeigt hat, ist eine möglichst baldige Sanierung bzw. Erneuerung nicht zu umgehen, da die Resttragfähigkeit der Asbestzementrohre nicht mehr der in der DIN 19850 geforderten Vergleichsspannung entspricht und somit mit dem Versagen der Leitung in naher Zukunft zu rechnen ist. Da die Innenkorrosion bereits soweit fortgeschritten ist, daß die in Kap. 5.2 beschriebenen aktiven Schutzmaßnahmen allein nicht mehr ausreichen, um eine dauerhafte Betriebssicherheit zu gewährleisten, stellen die Sanierungs- bzw. Erneuerungsverfahren die einzige Möglichkeit dar, das Versagen der Leitung zu verhindern.

Anhand des in Kap. 5.3.1 in Abb. 5.2 dargestellten Ablaufdiagramms läßt sich die Verfahrenshauptgruppe zur Schadensbehebung auswählen. Die Instandsetzungsverfahren sind generell nicht für eine Sanierung durch Innenkorrosion geschädigter Rohre geeignet, da sie lediglich für die Schadensbehebung örtlich begrenzter Schäden verwendet werden können.

Erneuerungsverfahren in offener Bauweise sollten ebenfalls nicht zum Einsatz gebracht werden. Die zu sanierende Leitung verläuft in einem bebauten Wohn- und Industriegebiet. Bei Baumaßnahmen in offener Bauweise würden die Bewohner nur unnötig belästigt und die Arbeitsbedingungen der Industriebetriebe erheblich beeinträchtigt. Da es sich bei dem zu entfernenden Rohrmaterial um Asbestzement handelt, müßte desweiteren die Baustelle entsprechend der Arbeits-schutzrichtlinien für das Betriebspersonal und zum Schutz der Anwohner mit Zelten luftdicht verschlossen werden, um das Entweichen von Asbestfasern, die im Verdacht stehen kanzerogene Wirkungen zu haben, zu verhindern.

Aus diesem Grunde sollten alle Verfahren zur Schadensbehebung, die einen Ausbau der Leitung vorsehen, nicht zur Anwendung gelangen. Außerdem würde die Beseitigung der Leitungen, die in ausgebautem Zustand Sondermüll darstellen, zusätzliche Kosten nach sich ziehen.

Bleibt bei den Erneuerungsmethoden nur das Berstverfahren, was zum Einsatz kommen könnte. Da es sich aber bei der zu berstenden Leitung um ein Asbestze-

ment-Druckrohr handelt, das besonders darauf ausgelegt ist, großem Innendruck zu widerstehen, ist auch dieses Verfahren eher kritisch zu beurteilen.

Die Sanierungsverfahren bieten i.a.. eine Vielzahl von Möglichkeiten, durch BSK angegriffene Kanäle dauerhaft zu sanieren. Die Montageverfahren scheiden allerdings aus, da sie nur in begehbaren Kanalquerschnitten ( $> \text{DN } 800$ ) eingesetzt werden können. In dem vorliegenden Fall handelt es sich aber um ein Rohr mit dem Durchmesser DN 300, also um einen nicht begehbaren Querschnitt.

Bei Beschichtungsverfahren werden Zementmörtel, reaktionsharzmodifizierte Zementmörtel oder Reaktionsharzmörtel auf die Rohrwand gebracht, wodurch die Tragfähigkeit wiederhergestellt und die chemische/biologische Widerstandsfähigkeit erhöht wird. Allerdings müssen hierbei erhebliche Querschnittsreduzierungen der Rohre in Kauf genommen werden, wodurch die hydraulische Leistungsfähigkeit beeinträchtigt wird. Der Einsatz von reaktionsharzmodifizierten- oder Reaktionsharzmörtel ist zudem sehr teuer.

Werden nur Zementmörtel eingesetzt, wird die BSK nicht unterbunden, und es muß weiter mit Innenkorrosion und infolge dessen mit Querschnittsverlusten der Rohre in Zukunft gerechnet werden. Beschichtungsverfahren stellen somit ebenfalls kein geeignetes Verfahren zu Behebung von Schäden, die durch biogene Schwefelsäure verursacht wurden, dar.

Die Relining-Verfahren ermöglichen es, dauerhaft eine Innenkorrosion zu sanieren. Das Kurzrohr-Relining ist allerdings auch nicht für diesen Anwendungsfall geeignet, da bei diesem Verfahren sehr viele Muffenverbindungen hergestellt werden, die, wie Untersuchungen in Kanalnetzen gezeigt haben /37/, eine große Gefahrenquelle für Undichtigkeiten darstellen.

Welches der drei noch verbleibenden Verfahren (Relining-, Schlauch-, Wickelrohr-Relining) letztlich zum Einsatz gelangt, ist von den örtlichen Gegebenheiten und den wirtschaftlichen Randbedingungen abhängig. Das Wickelrohr-Relining-Verfahren ist eine noch sehr junge Methode, so daß Erfahrungen mit diesem Verfahren noch sehr begrenzt sind. Die Zukunft muß erst noch zeigen, ob dieses Verfahren für die Sanierung durch biogene Schwefelsäure angegriffener Kanäle geeignet ist, so daß das Wickelrohr-Relining derzeit noch nicht zu empfehlen ist.



Das Schlauch-Relining-Verfahren bietet im wesentlichen alles, was zur Sanierung eines durch Innenkorrosion geschädigten Kanals benötigt wird. Allerdings hat das Verfahren für den vorliegenden Schadensfall einige gravierende Nachteile. So ist z.B. die dichte Wiederherstellung von Anschlußkanälen noch nicht befriedigend gelöst. Bei deformierten Rohren führen Abweichungen der Form zu statischen Einschränkungen. Der Verbund zwischen dem Insituform-Rohr und der zu sanierenden Leitung kann zur Zeit noch nicht gewährleistet werden. Bei kurzen Leitungen ist der Kostenanteil für Geräteeinsatz und Baustelleneinrichtung sehr hoch.

Diese Nachteile würden sich auch bei dem hier beschriebenen Schadensfall und den spezifischen Randbedingungen einstellen, so daß letztlich nur das Rohrstrang-Relining-Verfahren für die Sanierung des vorliegenden Schadens in Frage kommt.

Die für das Rohrstrang-Relining-Verfahren in Kap. 5.3.4.1 genannten Nachteile, sind in diesem Fall nicht sehr gravierend. Bei einer Tiefenlage von durchschnittlichen 1,30 m ist die erforderliche Einziehbaugrube in ihrer Größe durchaus vertretbar. Die sich bei der Sanierung ergebenden Querschnittsreduzierungen der Rohre werden durch das hydraulisch glatte Kunststoffmaterial wieder aufgehoben. Das Gefälle ist in diesem Fall so groß, daß geringe Abweichungen von den derzeitigen Verhältnissen eine untergeordnete Rolle spielen. Das Rohrstrang-Relining-Verfahren hat sich in der Praxis bereits gut bewährt und stellt wirtschaftlich als auch verfahrenstechnisch die optimale Lösung für diese Sanierungsmaßnahme dar. Durch den nachträglichen Einbau des Inliners wird die statische Tragfähigkeit wiederhergestellt und durch die glatte Innenwand ist der Kanal in Zukunft im hohen Maße gegen mechanischen, chemischen und biologischen Angriff beständig. Bei der Sanierung wird nur ein Rohrstrang pro Haltung erzeugt. Rohrverbindungen, die generell eine Schwachstelle im Kanal darstellen, werden somit vermieden, was eine dauerhafte und sichere Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit erwarten läßt. Desweiteren verbleibt das Asbestzement-Druckrohr im Boden und kann deshalb keine schädliche Wirkung auf die Umgebung entwickeln. Während der Sanierungsarbeiten ist aufgrund der Wassersättigung des Materials kein Entweichen von Asbestfasern und somit auch keine Gefährdung des Betriebspersonals zu erwarten.

Bevor die Sanierung mittels des Rohrstrang-Relining-Verfahrens durchgeführt werden kann, muß das korrodierte Material mit Hilfe von Hochdruckreinigungsgeräten von der geschädigten Leitung entfernt werden, um eine innige Verbindung des Verfüllmaterials und des neuen Inliners mit dem alten Rohr zu gewährleisten.

Das so entstehende und mit Asbestfasern belastete Abwasser sollte am Ende der zu sanierenden Leitung aufgefangen und anschließend ordnungsgemäß entsorgt werden, sofern die Kläranlage BS-Dibbesdorf nicht in der Lage ist, die Beseitigung der Asbestfasern sicherzustellen. Dies sollte in jedem Falle überprüft und kontrolliert werden.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Korrosion von Abwasserkanälen durch biogene Schwefelsäure bereitet wegen ihres schnellen Verlaufs mit entsprechend starker Zerstörung der zementgebundenen Rohrmaterialien auch in Deutschland zunehmend Probleme. Aufgrund der in den letzten Jahrzehnten vermehrt gebauten langen Abwasserleitungen können auf dem Fließweg bis zur zentralen Kläranlage die sulfatreduzierenden, sulfidproduzierenden, anaeroben Bakterien in der vom Abwasser benetzten Sichelhaut im Abwasser mitgeführte organische und anorganische Schwefelverbindungen zu Schwefelwasserstoff umsetzen. Dieser dissoziiert in Abhängigkeit vom pH-Wert und der Temperatur des Abwassers. Der flüchtige Anteil des Schwefelwasserstoffs entweicht in die Kanalatmosphäre, kondensiert unter bestimmten Voraussetzungen an der Kanalwand und steht den sulfidoxidierenden Thiobacillen der Gasraumsichelhaut als Substrat zur Verfügung. Die Thiobacillen wandeln im Zuge ihres Stoffwechsels Schwefelwasserstoff in Schwefelsäure um, die dann die Zementbestandteile des Betons oder des Asbestzementes zersetzt. Zementgebundene Baustoffe werden lösend (Schwefelsäurekorrosion) und treibend (Sulfatkorrosion) angegriffen, wobei bei starkem Säureangriff (pH-Wert unterhalb 3) dieser allein den Korrosionsverlauf bestimmt.

Vor allem hinter Druckrohrleitungen oder Rohrabschnitten mit stark turbulenten Fließverhältnissen (z.B. Sohlabstürze) ist mit großen Mengen Schwefelwasserstoffs zu rechnen. Als typisches, dadurch entstehendes, Schadensbild zeigt sich bei Betonrohren im Gasraum eine "waschbetonähnliche" Struktur, während bei Asbestzementrohren ein starkes Aufquellen der inneren Rohrwand im Bereich der Abwasserwechselzone zu beobachten ist.

Anhand eines vorliegenden Schadens an einem Asbestzementrohr wurde in dieser Arbeit eine Schadensanalyse vorgenommen. Hierbei zeigte sich, daß die aufgetretene Innenkorrosion durch biogene Schwefelsäure verursacht wurde.

Bei Untersuchungen der Resttragfähigkeit der Probekörper konnte festgestellt werden, daß die in DIN 19850 geforderte Vergleichsspannung für Freispiegelleitungen nicht erreicht wird. Eine möglichst baldige Sanierung der Leitung sollte umgehend eingeleitet werden, damit deren Versagen verhindert werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden eine Vielzahl von Schutzmaßnahmen und Sanierungsmöglichkeiten vorgestellt, die es ermöglichen, durch Innenkorrosion geschädigte Kanäle zu sanieren. Für die Lösung anstehender Sulfidprobleme stehen aktive und passive Schutzmaßnahmen zur Verfügung, wobei die aktiven Schutzmaßnahmen grundsätzlich positiver zu beurteilen sind. Sind auf Baustoffoberflächen pH-Werte oberhalb 3 zu erwarten, kann der BSK zementgebundener Baustoffe mit betontechnischen Maßnahmen begegnet werden. Bei niedrigeren pH-Werten sind passive Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Alle vorgestellten Verfahren und Maßnahmen weisen Vor- und Nachteile auf. Es gibt kein Universalverfahren, das unter allen möglichen Randbedingungen gleichermaßen technisch und wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar ist.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wird eine Sanierung mit dem Rohrstrang-Relining-Verfahren vorgeschlagen. Es handelt sich hierbei um ein in der Praxis bewährtes Verfahren, das sowohl verfahrenstechnisch als auch wirtschaftlich die optimale Lösung dieser Sanierungsmaßnahme darstellt. Das Verfahren bietet vor allem die Möglichkeit, die statische Tragfähigkeit wiederherzustellen und den Kanal auf Dauer gegen mechanische, chemische und biologische Angriffe beständig zu machen. Das Asbestzementmaterial verbleibt im Boden und kann somit keine schädliche Wirkung auf die Umgebung entwickeln. Sofern die Asbestfasern nicht in die Luft entweichen, sind sie für den Menschen unschädlich. Das durch die Reinigung entstehende, mit Asbestfasern belastete Abwasser, ist als Sondermüll zu betrachten und entsprechend zu entsorgen.

Ziel weiterer Korrosionsforschung muß es sein, den möglichen Angriffsgrad der Korrosion sicher zu quantifizieren und das Fortschreiten der Korrosion unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte zu verhindern. Angesichts der Tatsache, daß weltweit die Abwassernetze immer größer und die Fließzeiten dadurch immer länger und damit die Gefahr der BSK immer drängender werden, ist es geboten, die bisher gewonnenen Erfahrungen zu sammeln, auszuwerten und die daraus resultierenden Erkenntnisse bei den Planungen, zu berücksichtigen. Bei allen Überlegungen darf die Schulung des Personals nicht vergessen werden und zwar sowohl die Schulung der Planer wie der Betreiber. Die bestehenden Abwasserkanäle stellen ein großes, langfristiges Anlagevermögen dar. Es bedarf daher besonderer Sorgfalt bei der Behandlung von Fragen hinsichtlich ihrer Gefährdung durch Korrosion, speziell durch die Biogene-Schwefelsäure-Korrosion.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ LOHSE, M.: Schwefelverbindungen in Abwasserableitungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der biogenen Schwefelsäurekorrosion. In: Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Uni. Hannover, Heft 62, 1986
- /2/ BOCK, E.; SAND, W.; POHL, M.: Bedeutung der Mikroorganismen bei der Korrosion von Abwasserkanälen, Dauerhaftigkeit und Substanzerhaltung von Bauwerken. In: Sonderdruck zum 4. Statusseminar "Bauforschung und -technik" des BMFT, Bonn, 14./15.04.1983
- /3/ LOHSE, M.: Biogene Schwefelsäurekorrosion als Schadensursache undichter Kanäle. In: Gewässerschutz, Wasser, Abwasser, Heft 109, S. 548-578, 1988
- /4/ THISTLETHWAYTE, D.K.B.: The control of sulphides in sewerage systems, Butterworths (1972). Deutsche Übersetzung von Klose, N.: Sulfide in Abwasseranlagen - Ursachen, Auswirkungen, Gegenmaßnahmen, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1979
- /5/ BIELECKI, R.; SCHREMMER, H.: Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen. In: Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau der TU-Braunschweig, Heft 94, 1987
- /6/ SCHLEGEL, H.G.: Allgemeine Mikrobiologie. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1981
- /7/ POSGATE, J.R.: The sulphate-reduction bacteria, 2nd ed., London: Cambridge University Press, 1984
- /8/ NEUMANN, H.: Probleme beim Betrieb von Gruppenklärwerken und Gruppenkanalisationen - dargestellt aus der Sicht des Naturwissenschaftlers und unter besonderer Berücksichtigung der Themenkreise Geruch und Korrosion. In: Berichte der ATV, Band 30, S. 331-347, 1977
- /9/ POHL, M. et al.: Volatile sulfur compounds produced by methionine degrading bacteria and the relationship to concrete corrosion. In: Zeitschrift für Naturforschung, Band 39 c, S. 240-243, 1984

- /10/ U.S. EPA: Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems. In: U.S. Environmental Protection Agency, 1974
- /11/ BOON, A.G. et al.: The use of oxygen to treat sewage in a rising main. In: Water Pollution Control, Band 76, S. 98-112, 1977
- /12/ POMEROY, R.D.: Das Problem von Schwefelwasserstoff in Abwasserkanälen. In: Feugrès, Informations de la Fédération Européenne des Fabricants de Tuyaux en Grès, Nr. 6, S. 3-31, 1980
- /13/ MILDE, K. et al.: Thiobacilli of the corroded concrete walls of Hamburg sewer system. In: Journal of General Microbiology, Nr. 129, S. 1327-1333, 1983
- /14/ LAWRENCE, C.H.: Sewer corrosion potential. In: Journal Water Pollution Control Federation, Band 37, Nr. 8; S. 1067-1091, 1965
- /15/ WELLER, G.: Chemie und Physiologie der Gerüche und deren Messung. In: Schriftenreihe WAR, (Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TH Darmstadt), "Geruchsemissionen aus Abwasseranlagen, Nr. 9, S. 21-48, 1982
- /16/ PARKER, C.D. et al.: Hydrogen sulphide corrosion of concrete sewers, Part 6, Bacteriology of corrosion process. In: Melbourne and Metropolitan Board of Works, Technical Paper, Nr. A.8, 1965
- /17/ SCHREMMER, H.: Bildung der Schwefelsäure in Abhängigkeit vom  $H_2S$ -Gehalt und von der Temperatur in Abwasseranlagen. In: Dokumentation "Schwefelwasserstoff-Korrosion bei zementgebundenen Werkstoffen". Techn. Wiss. Schriftenreihe der ATV Nr. 7. S. 15-26, 1978
- /18/ SCHREMMER, H.: Über Betonzerstörung durch Schwefelsäure in Abwasseranlagen. In: Zement-Kalk-Gips, Nr. 17, S. 417-424, 1964
- /19/ SCHREMMER, H.: Biogene Schwefelsäure-Korrosion in Abwasseranlagen. In: Steinzeug-Information 1991, Ausgabe 38, S. 28-35, 1991
- /20/ WAGNER, R.: Messung der Schwefelwasserstoff-Bildung durch Bakterien-  
enschlämme. In: Vom Wasser 53, S. 107-119, 1979
- /21/ WAGNER, R.: Stellungnahme zu 51. In: Vom Wasser 62, S. 322-323, 1984

- /22/ DIN: Deutsch Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN 19800: Asbestzementrohre und -formstücke für Druckleitungen; Blatt 1 und 2, (01.1973)
- DIN 19850: Asbestzementrohre und -formstücke für Abwasserkanäle; Teil 1 und 2, (08.1981)
- DIN 4030: Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase; (11.1969)
- DIN 4032: Betonrohre und Formstücke; Maße, Technische Lieferbedingungen; (01.1981)
- DIN 4035: Stahlbetonrohre, Stahlbetondruckrohre und zugehörige Formstücke aus Stahlbeton; Maße, Technische Lieferbedingungen; (09.1976)
- /23/ EICK, H.; BAR-SHLOMO, S.: Asbestzementrohre und Schwefelwasserstoffkorrosion. In: Zeitschrift der Eternit AG, Spezialausgabe für Ingenieure, Nr. 9, S. 33-36, Schweiz 1980
- /24/ N.N.: Biogene Schwefelsäure-Korrosion in teilgefüllten Abwasserkanälen aus zementgebundenen Baustoffen. In: Korrespondenz Abwasser, Heft 8, S. 537-545, 1986
- /25/ SEYFRIED, C.F.; LOHSE, M.: Korrosion von Kanalisationsanlagen. In: ATV-Fortbildungskurs F/1, S. 14-1 - 14-19, 1987
- /26/ Trampenau, T.: Innenkorrosion von zementgebundenen Rohren für die Schmutzwasserkanalisation. Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 1992
- /27/ SEYFRIED, C.F.: Untersuchung von Korrosionsschäden in einem Abwassersammler. In: Technisch-wissenschaftliche Schriftenreihe der ATV, Band 7, S. 37-50, St. Augustin 1978
- /28/ STEIN, D.; NIEDEREHE, W.: Instandhaltung von Kanalisationen. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1987
- /29/ ATV: Abwassertechnische Vereinigung e.V. St. Augustin

ATV M 143 : Grundlagen für die Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Entwässerungskanälen und -leitungen.

ATV A 139 : Richtlinien für die Herstellung von Entwässerungskanälen und -leitungen (Entwurf 07.86).

- /30/ BROCKMANN, K.; BRUNE, P.: Ergebnisse einer Umfrage zur Anwendung von Verfahren zur Schadensbehebung in Kanalisationen. In: Korrespondenz Abwasser, Band 36, Heft 12, S. 1358-1366, 1990
- /31/ DAMMANN, P.: Sanierung korrodierter Abwasserrohre. 'Ausgeführte Beispiele aus Hamburg'. Vortrag im Haus der Technik, Essen 28.10.1985
- /32/ NIEDEREHE, W.; BRUNE, P.; BROCKMANN, K.: Dokumentation von Verfahren zur Schadensbehebung an Entwässerungskanälen und -leitungen. In: Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis; ATV, Heft 25, 1990
- /33/ RUDOLF, R.: Praktische Erfahrungen bei der Sanierung von Abwasserkanälen. In: Berichte der ATV, S. 127-137, 1985
- /34/ DVGW : Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Eschhorn  
  
DVGW W 307 : Richtlinien für das Verfüllen des Ringraumes zwischen Druckrohr und Mantelrohr bei Wasser Leitungskreuzungen mit Bahngelände (09.77)
- /35/ STEIN, D.; NIEDEREHE, W.; ZÄSCHKE, W.: Verfahren zum nachträglichen Einbringen von Produktrohren in unterirdische nichtbegehbare Hohlräume. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1984. S. 249-296, Verlag Glückauf, Essen 1983
- /36/ STEIN, D.; MÖLLERS, K.; NIEDEREHE, W.: Erneuerung von Abwasserkanälen und -leitungen unter besonderer Berücksichtigung des Berstverfahrens. In: Korrespondenz Abwasser 33, Heft 12, S. 1202-1206, 1986
- /37/ Schäden an Kanalisationen und deren Sanierung unter Berücksichtigung spezifischer Schadens-/Baustoffkombinationen. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz sowie Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig. Untersuchungsbericht im Auftrag der KTN GmbH & Co. KG, Wendhausen, 1991



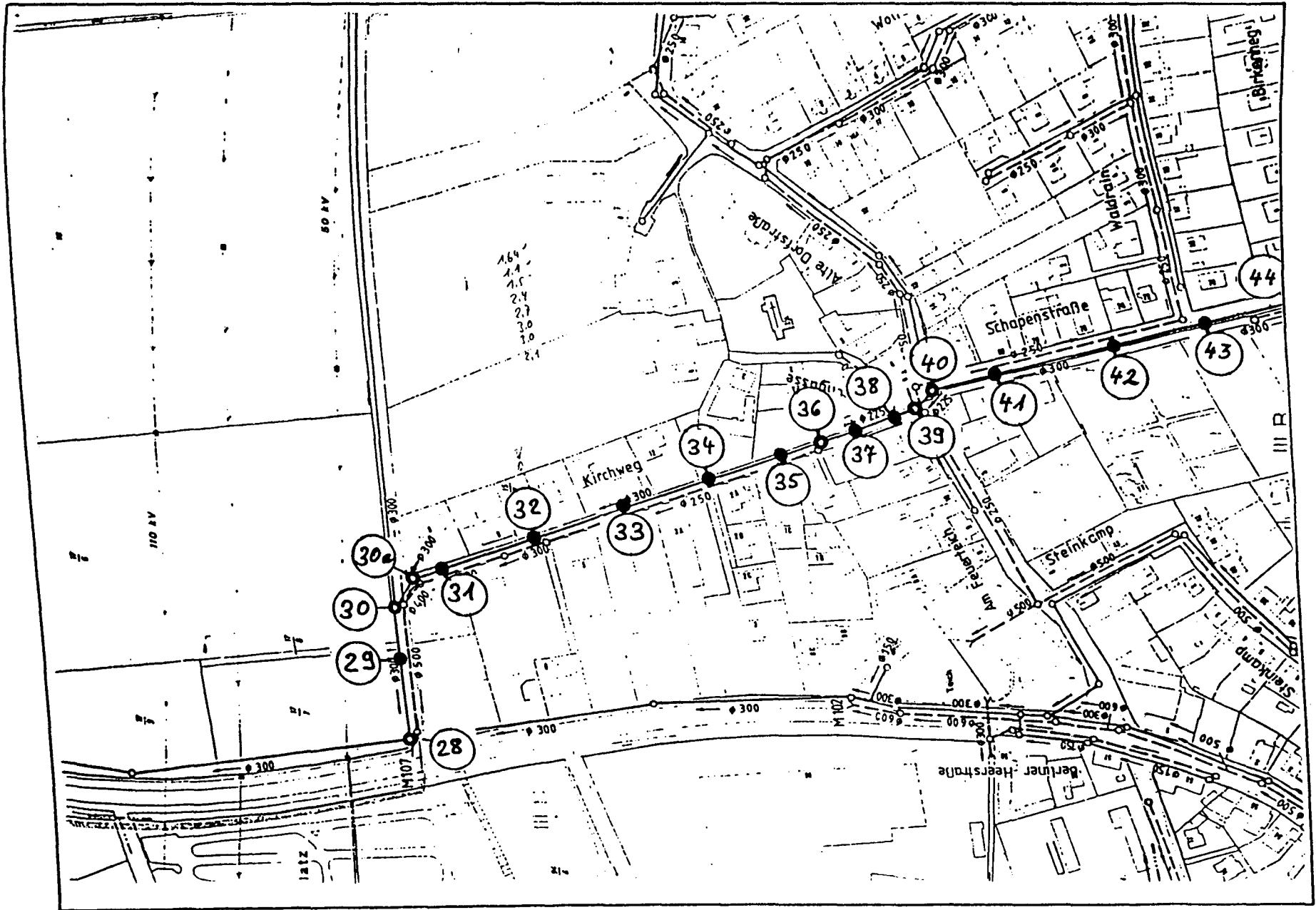


Abb. 1



INSTITUT FÜR GRUNDBAU  
UND BODENMECHANIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Gaußstraße 2      Tel.: 0531/391-2730  
3300 Braunschweig      Telex: 952737

## PROCTORVERSUCH

DIN 18127

Projekt : 4.11. Vorkmerode

Projektnummer

3 0 3 3

Entnahmeort : Kanalgraben

Entnahmedatum : 06.11.91

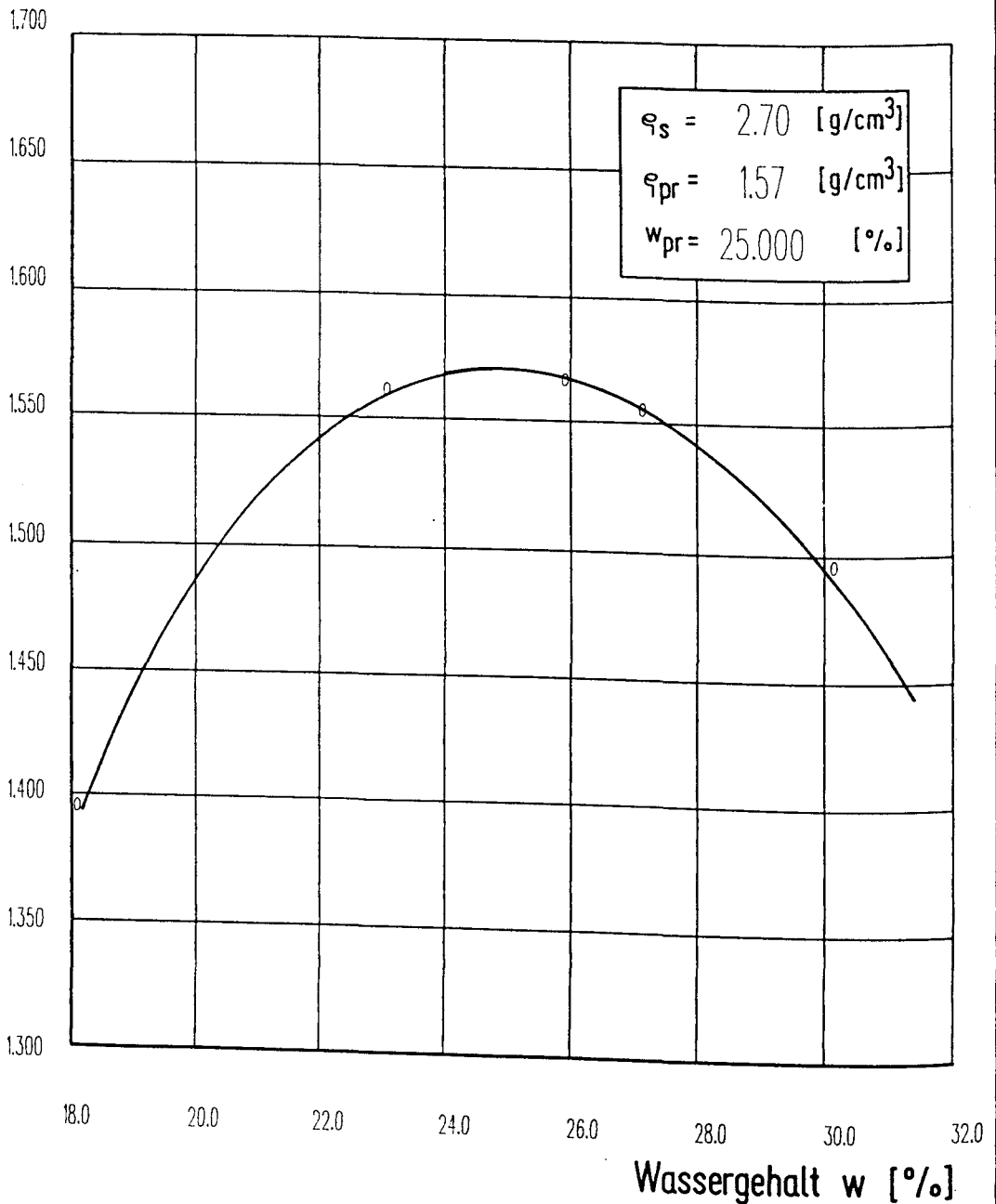
Labornummer

1 6 7 7

Probe Nr. :

Entnahmetiefe : 0.00

Trockendichte  $\rho_d$  [t/m<sup>3</sup>]



durchgeführt : Zee

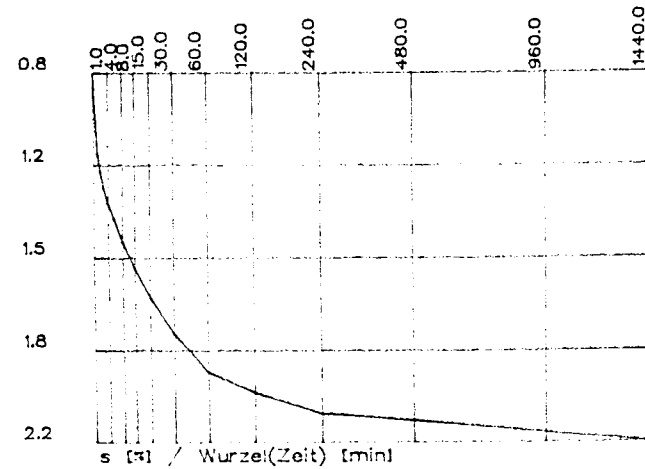
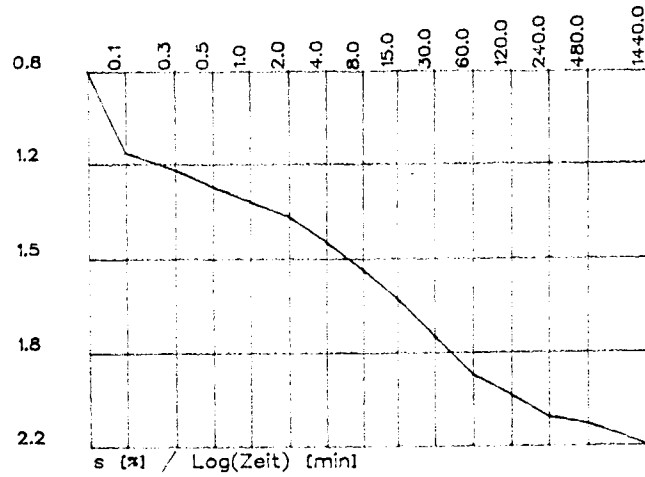
geprüft :

Anlage :

Abb. 2

Projekt: Kanalgraben KTN Volkmarode

Projekt-Nr.: 3033  
Labor-Nr.: 1677



durchgeführt:

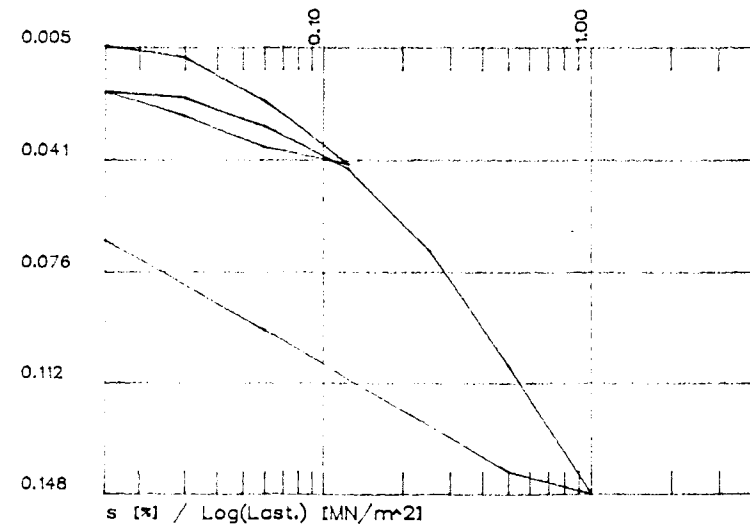
geprüft:

Anlage:

Projekt: Kanalgraben KTN Volkmarode

Projekt-Nr.: 3033  
Labor-Nr.: 1677

Entnahmest.: Kanalgraben KTN Volkmarode  
Entnahmetiefe [m]: 1.0  
Entnahmedatum: 06.11.91  
Bemerkung:  
Bodenart: TA  
Wassergehalt [-]: 0.328  
Trockendichte [ $\text{t/m}^3$ ]: 1.429



durchgeführt:

geprüft:

Anlage:



INSTITUT FÜR GRUNDBAU  
UND BODENMECHANIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Gaußstraße 2 Tel. 0531/391-2730  
3300 Braunschweig Telefax 0531/391-4574

# KORNGRÖSSENVERTEILUNG

DIN 18 123

Projekt : K.T.N. Volkmarode

Entnahmeort : Kanalgraben Entnahmedatum : 06.11.91

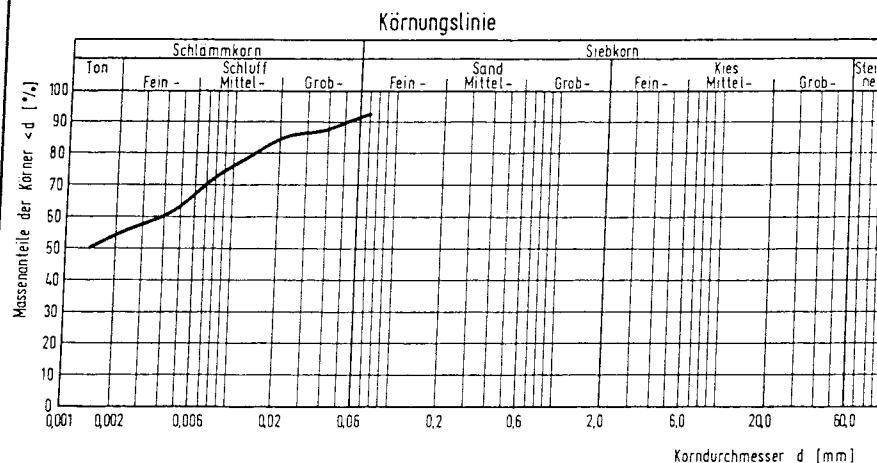
Probe Nr. : 1 Entnahmetiefe :

Projektnummer

3033

Labornummer

1678



Ton 54.1 [%]

Schluff 37.8 [%]

Feinsand k.A. [%]

Mittelsand k.A. [%]

Grobsand k.A. [%]

Feinkies k.A. [%]

Mittelkies k.A. [%]

Grobkies k.A. [%]

Steine k.A. [%]

$d_{10} = \text{k.A. [mm]}$

$d_{30} = \text{k.A. [mm]}$

$d_{60} = .0038 \text{ [mm]}$

Ungleichförmigkeit

$U = \text{k.A. [—]}$

Krümmung

$C_c = \text{k.A. [—]}$

k.A. = keine Angabe

durchgeführt :

*[Signature]*

geprüft :

Anlage :



INSTITUT FÜR GRUNDBAU  
UND BODENMECHANIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Gaußstraße 2 Tel. 0531/391-2730  
3300 Braunschweig Telefax 0531/391-4574

# KORNGRÖSSENVERTEILUNG

DIN 18 123

Projekt : K.T.N. Volkmarode

Entnahmeort : Kanalgraben Entnahmedatum : 06.11.91

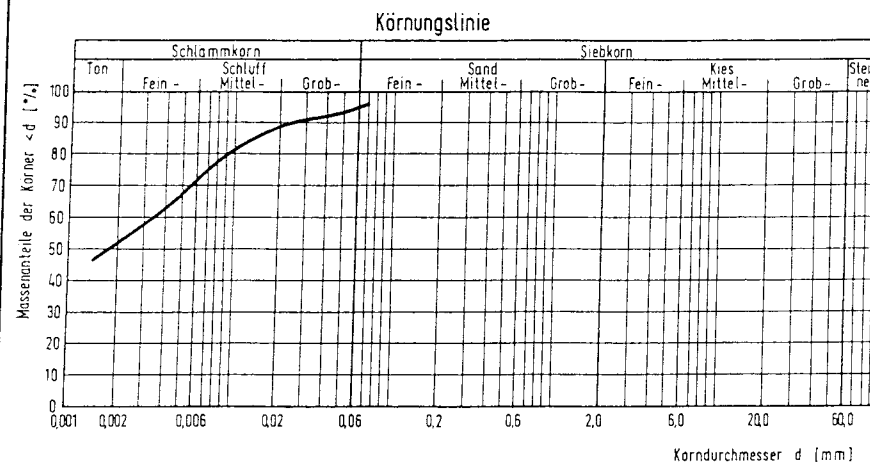
Probe Nr. : 5 Entnahmetiefe :

Projektnummer

3033

Labornummer

1677



Ton 50.7 [%]

Schluff 43.7 [%]

Feinsand k.A. [%]

Mittelsand k.A. [%]

Grobsand k.A. [%]

Feinkies k.A. [%]

Mittelkies k.A. [%]

Grobkies k.A. [%]

Steine k.A. [%]

$d_{10} = \text{k.A. [mm]}$

$d_{30} = \text{k.A. [mm]}$

$d_{60} = .0036 \text{ [mm]}$

Ungleichförmigkeit

$U = \text{k.A. [—]}$

Krümmung

$C_c = \text{k.A. [—]}$

k.A. = keine Angabe

durchgeführt :

*[Signature]*

geprüft :

Anlage :

